

**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**Trabajo Fin de Grado**

**SIMULACIÓN MECÁNICA DE  
SISTEMAS FERROVIARIOS**

**Autor**

**Víctor Rueda García**

**Director**

**Higinio Rubio Alonso**

Leganés, 2017



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres y a mi hermana, y a mi familia en general, por ser mi soporte, por darme fuerza, no solo durante la realización de este Trabajo Fin de Grado, sino a lo largo de mi vida.

No me puedo olvidar de mi familia de otra sangre de Talavera, ni de mis amigos, como Jorge, que me ha acompañado desde parvulario, ni de mi familia dentro del tatami, gracias por haber forjado mi personalidad de hoy en día.

Y durante estos cuatro años de carrera, gracias a toda mi FAMilia por hacer de Leganés un hogar para mí, en especial a Ana y a Carlos, con quienes he superado tantos MOMENTOS difíciles.

También me gustaría agradecer a mi tutor, Higinio Rubio, todo el tiempo empleado conmigo, y por enseñarme a madurar, por enseñarme lo que es de verdad la ingeniería.

Por último, me gustaría hacer una mención especial a Alberto, el causante de mi vocación ingenieril, mi profesor de tecnología del instituto, ¡gracias por invertir tu presente en moldear nuestro futuro!



## Resumen

La principal motivación de este trabajo fin de grado es analizar el comportamiento de los valores de los armónicos característicos de las gráficas de la densidad espectral de potencia de las vibraciones recogidas en el centro de masas de los ejes y en las cajas de grasas de un vehículo ferroviario, al simular un determinado trayecto con el software de simulación ferroviaria Universal Mechanism.

La siguiente memoria se estructura en 8 capítulos. En el primero de ellos se presenta el proyecto, dando un breve resumen de los objetivos del proyecto, el entorno socioeconómico del ferrocarril, y el marco legal.

El segundo capítulo se centra en los conceptos fundamentales necesarios para entender el funcionamiento del sistema ferroviario, incluyendo el ferrocarril propiamente dicho, así como una introducción acerca de la vía ferroviaria.

En el tercer capítulo se explican todas las herramientas informáticas utilizadas, las cuales son Universal Mechanism como software de simulación ferroviaria, y Matlab y Excel para el tratamiento de los datos registrados.

En el cuarto capítulo se desarrolla toda la metodología que se ejecutará para la elaboración del presente proyecto.

En los capítulos quinto y sexto se desarrollan las simulaciones a partir de las cuales se tomarán los datos de aceleraciones necesarios para realizar el análisis de sus respectivas PSD. El primer experimento es un modelo sencillo, similar a un tranvía, mientras que el segundo se trata de un vagón que se integra en un vehículo completo.

Por último, en el séptimo capítulo se presenta la memoria económica del proyecto, y en el octavo se sintetizan todas las conclusiones extraídas de la realización del análisis de los valores de los principales armónicos de las PSD de las vibraciones en los puntos elegidos del ferrocarril al circular en unas determinadas condiciones de circulación.

**Palabras clave:** Universal Mechanism, caja de grasas, conjunto de rodadura, Matlab, armónico, PSD.

## Abstract

The main goal of this Final Grade Project is to analyze the behavior of the values of the most important harmonics of the PSD graphs from the vibrations collected in the center of mass of the axles and in the axleboxes of a railway vehicle, with the software of railway simulation Universal Mechanism.

The next memoir is structured in 8 chapters. In the first one the project is presented, making a short summary of the goals of the project, the socioeconomic context, and the legal framework.

The second chapter focuses on the previous basic concepts needed to understand the operation of the railway system, obviously including the vehicle and an introduction about the railroad.

In the third chapter there is an explanation of all the informatics tools used to develop this project, which are Universal Mechanism as software of railway simulation, and Matlab and Excel for the treating of the data collected.

In the fourth chapter it's developed all the methodology followed to elaborate this project.

In the fifth and sixth chapters the simulations are developed, from which the necessary acceleration data will be taken to perform the analysis of their respective PSD. The first experiment is a simple model, similar to a tram, while the second is a wagon that integrates into a complete vehicle.

Finally, the seventh chapter includes the budget of the project, and in the eighth chapter there is a synthesis of all the conclusions extracted from the performance of the analysis of the values of the main harmonics of the PSD graphs of the vibrations in the study points while it drives along some determined conditions.

**Key words: Universal Mechanism, axlebox, wheelset, Matlab, harmonic, PSD.**

## Índice general

Índice de figuras .....	8
Índice de tablas .....	13
Introducción.....	14
1.1 Ámbito y motivación.....	14
1.2 Objetivos del Trabajo Fin de Grado .....	16
1.3 Marco legal .....	18
El sistema ferroviario .....	20
2.1 Infraestructura .....	20
2.2 Superestructura.....	23
2.3 La vía .....	25
2.3.1 La plataforma .....	25
2.3.2 El balasto.....	26
2.3.3 El carril .....	27
2.3.4 Las traviesas .....	28
2.4 Material rodante .....	29
2.4.1 Material remolcado.....	30
2.4.2 El bogie.....	31
Herramientas informáticas .....	34
3.1 Universal Mechanism.....	35
3.1.1 Estructura de Universal Mechanism .....	36
3.1.3 Módulos de Universal Mechanism .....	40
3.1.4 Alternativas comerciales a Universal Mechanism.....	44
3.2 Matlab.....	48
3.2.1 Código usado para el procesado de datos .....	48
3.2.2 Densidad espectral de potencia .....	50
Metodología.....	52
Experimento básico.....	57
5.1 Modelo utilizado .....	58
5.2 Trayecto simulado .....	61
5.3 Configuración de Universal Mechanism .....	62
5.4 Resultados obtenidos.....	65

---

Experimento avanzado .....	79
6.1 Modelo utilizado .....	80
6.2 Introducción de las cajas de grasa .....	83
6.3 Trayecto simulado .....	85
6.4 Configuración de Universal Mechanism .....	86
6.5 Resultados.....	86
Presupuesto.....	97
Conclusiones.....	100
8.1 Conclusiones .....	100
8.2 Trabajos futuros .....	102
Referencias .....	103
Anexos.....	106
8.1 Anexos del experimento básico .....	107
8.2 Anexos del experimento con un modelo complejo .....	110



## Índice de figuras

Figura 1.1 Talgo 350 SRO, de Talgo.....	15
Figura 2.1 Ejemplo de viaducto.....	21
Figura 2.2 Paso a distinto nivel .....	21
Figura 2.3 Espiral de Cornu o Clotoide .....	22
Figura 2.4 Desvío.....	24
Figura 2.5 Travesía .....	24
Figura 2.6 Plataforma.....	26
Figura 2.7 Capas de asiento.....	26
Figura 2.8 Carril ferroviario .....	28
Figura 2.9 Locomotora de vapor y coches .....	29
Figura 2.10 Caja de grasas .....	30
Figura 2.11 Bogie .....	32
Figura 3.1 Logo Universal Mechanism [7] .....	35
Figura 3.2 Interfaz UM Input .....	37
Figura 3.3 Interfaz inicial UM Simulation .....	38
Figura 3.4 Interfaz UM Simulation de trabajo .....	39
Figura 3.5 Interfaz UM Loco, dentro de UM Input .....	41
Figura 3.6 Parámetros geométricos en una simulación 2D [12].....	42
Figura 3.7 Flujo esquemático de fuerzas [12] .....	43
Figura 3.8 UM Automotive .....	44
Figura 3.9 Interfaz Simpack .....	45
Figura 3.10 Entorno de simulación Adams Rail.....	46
Figura 3.11 Logos Resonate Group Limited y Vampire.....	46
Figura 3.12 Logo de la compañía MathWorks.....	48
Figura 5.1 Vista isométrica del modelo “AC4”.....	58
Figura 5.2 Sistema de referencia Universal Mechanism.....	58
Figura 5.3 Visualización del WheelSet.....	59
Figura 5.4 Visualización de la caja del modelo “AC4” .....	60
Figura 5.5 Visualización externa de la caja de grasas .....	61
Figura 5.6 Visualización interna de la caja de grasas .....	61
Figura 5.7 Perfil de las irregularidades en la vía .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5.8 Especificaciones técnicas del carril utilizado [20].....	62
Figura 5.9 Ventana inicial UM-Simulation.....	62
Figura 5.10 Ventana “Object simulation inspector” .....	63
Figura 5.11 Ventana del gestor de variables .....	64

Figura 5.12 Ventana de gráficos .....	64
Figura 5.13 Aceleraciones en el WSet, tramo con fallos .....	66
Figura 5.14 Aceleraciones en la caja de grasas izquierda, tramo con fallos .....	66
Figura 5.15 Aceleraciones en la caja de grasas derecha, tramo con fallos .....	67
Figura 5.16 Aceleraciones en el WSet, tramo sin fallos .....	67
Figura 5.17 Aceleraciones en la caja de grasas izquierda, tramo sin fallos .....	68
Figura 5.18 Aceleraciones en la caja de grasas derecha, tramo con fallos .....	68
Figura 5.19 PSD en el WSet a 39,06m/s, con irregularidades .....	69
Figura 5.20 PSD en la caja de grasas izquierda a 39,06m/s, con irregularidades .....	70
Figura 5.21 PSD en la caja de grasas derecha a 39,06m/s, con irregularidades.....	70
Figura 5.22 PSD en el WSet a 39,06m/s, sin irregularidades .....	70
Figura 5.23 Separación media entre los picos del PSD .....	71
Figura 5.24 Amplitud según la velocidad, WSet, pico 1, experimento inicial.....	72
Figura 5.25 Amplitud según la velocidad, WSet, pico 2, experimento inicial.....	72
Figura 5.26 Amplitud según la velocidad, WSet, pico 3, experimento inicial.....	73
Figura 5.27 Amplitud según la velocidad, caja derecha, pico 1 .....	73
Figura 5.28 Amplitud según la velocidad, caja izquierda, pico 1.....	74
Figura 5.29 Comparativa del primer pico de la PSD en el primer experimento .....	74
Figura 5.30 Frecuencias de aparición del primer valle, WSet.....	75
Figura 5.31 Amplitud del pico triangular, WSet .....	75
Figura 5.32 Frecuencia de aparición del pico triangular, WSet .....	76
Figura 5.33 Amplitud del pico triangular, caja de grasas izquierda .....	76
Figura 5.34 Frecuencia de aparición del pico triangular, caja de grasas izquierda .....	77
Figura 5.35 Amplitud del pico triangular, caja de grasas derecha.....	77
Figura 5.36 Frecuencia de aparición del pico triangular, caja de grasas derecha.....	78
Figura 6.1 Apariencia del coche de pasajeros, PassengerCarExtR .....	80
Figura 6.2 Visualización del bogie, PassengerCarExtR .....	81
Figura 6.3 Visualización del WSet, PassengerCarExtR .....	81
Figura 6.4 Previsualización de la caja de grasa .....	83
Figura 6.5 Configuración del inspector de datos .....	84
Figura 6.6 Configuración de la restricción.....	85
Figura 6.7 Frecuencia media entre armónicos en función de la velocidad .....	86
Figura 6.8 Valor del primer armónico según la velocidad, WSet1.....	87
Figura 6.9 Valor del segundo armónico según la velocidad, WSet1 .....	88
Figura 6.10 Valor del tercer armónico según la velocidad, WSet1 .....	88
Figura 6.11 Valor del primer armónico según la velocidad, caja de grasas derecha, WSet1 .....	89
Figura 6.12 Valor del segundo armónico según la velocidad, caja de grasas derecha, WSet1 .....	89
Figura 6.13 Valor del tercer armónico según la velocidad, caja de grasas derecha, WSet1 .....	90

Figura 6.14 Valor del primer armónico según la velocidad, caja de grasas izquierda, WSet1 .....	90
Figura 6.15 Valor del segundo armónico según la velocidad, caja de grasas izquierda, WSet1 .....	91
Figura 6.16 Valor del primer armónico según la velocidad, caja de grasas izquierda, WSet1 .....	91
Figura 6.17 Comparativa del valor del primer armónico en el primer eje .....	92
Figura 6.18 Armónicos en los ejes a 40m/s.....	93
Figura 6.19 Armónicos en las cajas de grasa izquierdas a 40m/s.....	94
Figura 6.20 Armónicos en las cajas de grasa derechas a 40m/s .....	94
Figura 6.21 Armónicos en los ejes a 36m/s.....	94
Figura 6.22 Armónicos en las cajas de grasa izquierdas a 36m/s.....	95
Figura 6.23 Armónicos en las cajas de grasa derechas a 36m/s .....	95
Figura A.1 Valor del segundo armónico, WSet, primer experimento .....	107
Figura A.2 Valor del tercer armónico, WSet, primer experimento .....	107
Figura A.3 Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, primer experimento .....	108
Figura A.4 Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda, primer experimento .	108
Figura A.5 Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, primer experimento	109
Figura A.6 Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, primer experimento....	109
Figura A.7 Valor del primer armónico, WSet 2, segundo experimento .....	110
Figura A.8 Valor del segundo armónico, WSet2, segundo experimento.....	110
Figura A.9 Valor del tercer armónico, WSet2, segundo experimento.....	111
Figura A.10 Valor del primer armónico, caja de grasas derecha, WSet2, segundo experimento .....	111
Figura A.11 Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, WSet2, segundo experimento .....	112
Figura A.12 Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, WSet2, segundo experimento .....	112
Figura A.13 Valor del primer armónico, caja de grasas izquierda, WSet2, segundo experimento .....	113
Figura A.14 Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, WSet 2, segundo experimento .....	113
Figura A.15 Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda, WSet2, segundo experimento .....	114
Figura A.16 Valor del primer armónico, WSet 3, segundo experimento .....	114
Figura A.17 Valor del segundo armónico, WSet3, segundo experimento.....	115
Figura A.18 Valor del tercer armónico, WSet3, segundo experimento.....	115
Figura A.19 Valor del primer armónico, caja de grasas derecha, WSet3, segundo experimento .....	116
Figura A.20 Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, WSet3, segundo experimento .....	116

Figura A.21 Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, WSet3, segundo experimento .....	117
Figura A.22 Valor del primer armónico, caja de grasas izquierda, WSet3, segundo experimento .....	117
Figura A.23 Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, WSet 3, segundo experimento .....	118
Figura A.24 Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda WSet 3, segundo experimento .....	118
Figura A.25 Valor del primer armónico, WSet4, segundo experimento .....	119
Figura A.26 Valor del segundo armónico, WSet4, segundo experimento .....	119
Figura A.27 Valor del tercer armónico, WSet4, segundo experimento .....	120
Figura A.28 Valor del primer armónico, caja de grasas derecha, WSet4, segundo experimento .....	120
Figura A.29 Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, WSet4, segundo experimento .....	121
Figura A.30 Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, WSet4, segundo experimento .....	121
Figura A.31 Valor del primer armónico, caja de grasas izquierda, WSet4, segundo experimento .....	122
Figura A.32 Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, WSet 4, segundo experimento .....	122
Figura A.33 Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda WSet 4, segundo experimento .....	123
Figura A.34 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 4m/s .....	123
Figura A.35 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 4 m/s .....	124
Figura A.36 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 8m/s .....	124
Figura A.37 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 8 m/s .....	125
Figura A.38 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 8 m/s .....	125
Figura A.39 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 12m/s .....	126
Figura A.40 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 12 m/s .....	126
Figura A.41 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 12 m/s .....	127
Figura A.42 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 16 m/s .....	127
Figura A.43 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 16 m/s .....	128
Figura A.44 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 16 m/s .....	128
Figura A.45 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 20 m/s .....	129

Figura A.46 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 20 m/s.....	129
Figura A.47 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 20 m/s.....	130
Figura A.48 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 24 m/s.....	130
Figura A.49 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 24 m/s.....	131
Figura A.50 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 24 m/s.....	131
Figura A.51 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 28 m/s.....	132
Figura A.52 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 28 m/s.....	132
Figura A.53 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 28 m/s.....	133
Figura A.54 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 32 m/s.....	133
Figura A.55 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 32 m/s.....	134
Figura A.56 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 32 m/s.....	134
Figura A.57 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 44 m/s.....	135
Figura A.58 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 44 m/s.....	135
Figura A.59 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 44 m/s.....	136
Figura A.60 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 48 m/s.....	136
Figura A.61 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 48 m/s.....	137
Figura A.62 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 48 m/s.....	137
Figura A.63 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 52 m/s.....	138
Figura A.64 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 52 m/s.....	138
Figura A.65 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 52 m/s.....	139
Figura A.66 Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 56 m/s.....	139
Figura A.67 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 56 m/s.....	140
Figura A.68 Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 56 m/s.....	140

## Índice de tablas

Tabla 5.1 Especificaciones del WSet del modelo “AC4” .....	59
Tabla 5.2 Especificaciones de la caja del modelo “AC4” .....	60
Tabla 5.3 Especificaciones de las cajas de grasas del modelo “AC4” .....	60
Tabla 5.4 Número de datos obtenidos en el primer experimento .....	65
Tabla 6.1 Características del Carbody, PassengerCarExtR .....	81
Tabla 6.2 Características del bogie, PassengerCarExtR .....	81
Tabla 6.3 Características del WSet, PassengerCarExtR .....	82
Tabla 6.4 Características de las caja de grasas .....	82
Tabla 7.1 Presupuesto del proyecto .....	98

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Ámbito y motivación

El sector ferroviario conforma una de las mayores áreas de desarrollo a nivel mundial. Esto es debido al elevado uso que hacemos de él tanto para transporte de personas como para transporte de mercancías. De este modo, la sociedad ha sido capaz de crear conexiones y redes no solo entre ciudades, sino incluso entre territorios de distintos países.

Concretamente, en España, la historia del ferrocarril comienza en el siglo XIX, con la inauguración de la primera línea en territorio español que conectaba La Habana y Güines en Cuba en 1837. Sin embargo, al territorio peninsular la primera línea no llegaría hasta 1848, en un trayecto de 28 kilómetros que unía Barcelona y Mataró, seguido tres años más tarde por la conexión Madrid-Aranjuez. En los siguientes años las inversiones de pequeñas compañías privadas facilitaron la expansión del sistema ferroviario a lo largo de todo el país. Gracias al impulso de creación de líneas ferroviarias, fue posible un mayor



desarrollo durante la revolución industrial, ya que hizo posible la creación de rutas comerciales más directas y que requerían menos tiempo para el transporte de mercancías. [1]

El desarrollo del ferrocarril en España no solo se limitó al inicio de la revolución industrial, sino que se ha mantenido a lo largo de los años, convirtiendo a España en uno de los mayores innovadores a nivel mundial en lo que a líneas de Alta Velocidad se refiere. Actualmente, España cuenta con un presupuesto total de unos 1300 millones de euros para el desarrollo de infraestructuras y la compra de trenes AVE. Entre todo el sector ferroviario español destaca la empresa Talgo (Figura 1.1), cuyo objetivo se ha centrado en el cierre de grandes contratos a nivel internacional, proyectos con una gran carga de innovación, como puede ser el proyecto cuyo fin consiste en la construcción de una línea ferroviaria por el desierto que permita un acceso más directo a la meca. Esto supone un gran reto, debido a la dificultad que presenta la circulación a través de la arena del desierto. [2]



**Figura 1.1 Talgo 350 SRO, de Talgo.**

Sin embargo, a pesar de los grandes avances alcanzados en los últimos años, todavía queda mucho que mejorar, sobre todo con el aumento de velocidad al que se ha llegado actualmente. Esto plantea muchos problemas, sobre todo a la hora de conseguir un buen grado de confort para los pasajeros, teniendo para ello que eliminar de manera eficaz las vibraciones y el ruido.



A pesar de todo, actualmente existen una gran cantidad de simuladores en el mercado, que permiten a las empresas realizar pruebas en condiciones cada vez más realistas sin que sea necesario la construcción del vehículo físico, lo cual supone un gran ahorro tanto en tiempo como en dinero, pudiendo tener una idea muy aproximada de lo que sucederá realmente con el modelo a estudiar si se pone en funcionamiento.

De este modo, y dada la creciente importancia del ferrocarril a nivel mundial, resulta primordial realizar experimentos con los simuladores arriba mencionados, de modo que sea posible ajustar cada vez más el grado de realismo que proporcionan, para que así se puedan desarrollar modelos nuevos, o solventar problemas en modelos ya existentes de manera más eficaz.

## 1.2 Objetivos del Trabajo Fin de Grado

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es el estudio analítico de la evolución con la velocidad de las principales componentes de la gráfica de la densidad espectral de potencia, obtenida a partir de las vibraciones verticales tomadas en el centro del eje montado y en las cajas de grasas, cuando el tren opera con distintas configuraciones de trayectos.

Para conseguir esto, se usará como herramienta de apoyo el software de simulación comercial *Universal Mechanism*, cuyo funcionamiento se describirá en los próximos apartados, y que permite el uso de varios modelos de vehículos ferroviarios y la modificación de los mismos para obtener los datos necesarios para realizar el estudio. Una vez obtenidos dichos datos, de las simulaciones, se empleará el software comercial Matlab como herramienta de análisis de datos y obtener las gráficas de las densidades espectrales de potencia.

Para alcanzar el objetivo principal del proyecto, es necesario pasar por los siguientes sub-objetivos o fases de desarrollo, a través de las cuales se estructura el proyecto para hacer el trabajo de forma correcta:

- En primer lugar, es necesario un estudio del mundo ferroviario, para conocer todos y cada uno de los elementos que tendrán un papel tanto en el desarrollo de la

simulación propiamente dicho, como en la fase de modificación del modelo que será utilizado. El estudio se realizará por medio de una búsqueda detallada de documentación.

- En segundo lugar, se debe realizar una investigación sobre los programas de software de simulación ferroviaria disponibles en el mercado que permiten resolver de manera correcta el problema que se pretende abordar. Para ello se realizará una búsqueda y se consultará con distintos expertos en la materia. Finalmente, se seleccionará uno de ellos.
- Una vez seleccionado el software de simulación ferroviaria, se pasará a una fase de definición de todas las posibilidades ofrecidas por el programa, de modo que sea posible obtener el alcance y limitaciones del mismo. Todo esto se conseguirá mediante la documentación en forma de tutoriales proporcionada por la página web del desarrollador de *Universal Mechanism*.
- El estudio de las posibilidades ofrecidas por el programa *Universal Mechanism* se afianzará realizando un estudio inicial sobre un modelo realista sencillo, sobre el que se efectuará una serie de simulaciones de prueba y se plantearán una serie de simulaciones similares a las que se practicarán sobre el modelo final.
- Se seleccionará un modelo complejo, de varios vehículos, y se repetirán los experimentos planteados anteriormente, con las condiciones también definidas anteriormente, pudiendo añadir alguna configuración más en el trayecto con el fin de obtener más datos de contraste.
- Una vez realizadas las simulaciones pertinentes, se procesarán los datos con el software Matlab, para obtener las gráficas de la densidad espectral de potencia.
- A partir de las gráficas de la densidad espectral de potencia, se analizarán la evolución de distintos picos de frecuencias, tratando de obtener patrones relacionados con la variación de la velocidad.
- Por último, tras haber realizados ambos experimentos, se resumirán los resultados obtenidos en forma de conclusión, y se analizarán las posibilidades que ofrecen dichos resultados de cara a trabajos futuros.

Para las simulaciones de los vehículos ferroviarios se utilizará el programa Universal Mechanism. Para el procesamiento de las señales vibratorias se empleará el software Matlab y para realizar las gráficas de evolución de los picos se usará el programa Microsoft Excel.

### 1.3 Marco legal

A lo largo de este capítulo se expondrá todo lo relativo a la normativa vigente en este país dentro del sector ferroviario. Para ello, se accederá a fuentes oficiales y se consultarán las principales normas UNE relacionadas con el entorno ferroviario.

Debido a la naturaleza y objetivos de este proyecto, al ser un trabajo de investigación con el objetivo subyacente de comprobar el método de cálculo de resultados del software Universal Mechanism, no existe una legislación que regule a priori ninguno de los aspectos relativos al mismo, ni el trayecto en el que deba ser simulado el vehículo ferroviario ni las velocidades a las que deben ser realizados los experimentos. Sin embargo, sí existen normas relativas a los elementos ferroviarios, por lo que a continuación se expone una lista con las principales normas aplicables a este proyecto:

- Ley de 24 de Enero de 1941, de ordenación ferroviaria y de transporte por carretera. (BOE de 28 de Enero de 1941). [3]

- Real Decreto 810/2007, de 22 Junio. Reglamento de Seguridad en Circulación de Red Ferroviaria de Interés General. (BOE de 13 de Julio de 2007). [3]

- UNE-En13262:2005+A2:2011; Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Requisito de producto.

- “Especificación técnica de homologación de material rodante ferroviario: Locomotoras”; Resolución del 10 de Mayo de 2017 de la Dirección de la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria. [4]

- “Especificación técnica de homologación de material rodante ferroviario: Unidades autopropulsadas”; Resolución del 10 de Mayo de 2017 de la Dirección de la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria. [4]

---

-UNE-EN 61373:2011; Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Ensayos de choque y vibración.

-UNE-EN 13129:2017; Aplicaciones ferroviarias. Aire acondicionado para el material rodante de grandes líneas. Parámetros de confort y ensayos de tipo. [5]

-UNE-EN 14363:2017; Aplicaciones ferroviarias. Ensayos y simulaciones para la aceptación de las características dinámicas de los vehículos ferroviarios. Comportamiento dinámico y ensayos estáticos. [5]

- UNE-EN 16729-1:2016; Aplicaciones ferroviarias. Infraestructura. Ensayos no destructivos en carriles de vía. Parte 1: Requisitos para los principios de evaluación y de inspección por ultrasonidos. [5]

De este modo, se abarcan algunas de las principales normativas y leyes relativas tanto a irregularidades de la vía como a material rodante y sus especificaciones técnicas requeridas para obtener una homologación. También existen ciertas directrices europeas relativas a la operabilidad del sistema ferroviario, tanto del sistema de Alta Velocidad como del sistema convencional, y que incluyen también pautas para una circulación segura del vehículo.

## Capítulo 2

# El sistema ferroviario

El objetivo de este capítulo es realizar una toma de contacto con los conceptos fundamentales que rodean al entorno ferroviario. Dentro de estos puntos se incluirá todo lo relativo a la infraestructura, superestructura y al vehículo propiamente dicho, que permita una comprensión más sencilla del contenido desarrollado en el presente trabajo fin de grado.

### 2.1 Infraestructura

Se entiende por infraestructura en el ámbito ferroviario todas aquellas obras previas necesarias para poder construir la plataforma sobre la que circulará el ferrocarril. La infraestructura se divide principalmente en obras de defensa y obras de fábricas, que se explican más detenidamente en los siguientes párrafos:

*-Obras de defensa:* Salvaguardan las obras de fábrica y el resto de elementos ferroviarios, consiguiendo la evacuación de residuos, de manera que se evita su deterioro.

Forman parte de este conjunto construcciones como los drenajes o los muros de contención.

*-Obras de fábrica:* Dentro de este tipo de obras englobamos todas aquellas que permiten evitar los obstáculos que presenta el terreno de manera natural. Existen muchas construcciones distintas según la irregularidad que debamos salvar. Por ejemplo, tenemos los viaductos, que hacen posible atravesar depresiones de una gran longitud. [6]



**Figura 2.1 Ejemplo de viaducto**

Para salvar distancias menores, las estructuras utilizadas se denominan puentes. También existen otro tipo de obstáculos a evitar, como pueden ser los cruces entre diversas vías, sean las dos ferroviarias, o solo una de ellas. Para ello existe la posibilidad de construir tanto pasos a nivel, como pasos a distinto nivel.



**Figura 2.2 Paso a distinto nivel**

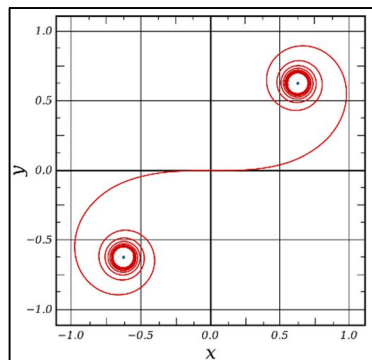
Finalmente, cabe destacar como última obra de fábrica aquella que permite evitar tener que rodear montañas, los túneles. También se pueden usar para evitar atravesar zonas urbanas.

Otro de los elementos fundamentales de la infraestructura es el trazado, que tendrá especial importancia en proyectos del ámbito del presente, ya que en función del trayecto por el que transite el ferrocarril obtendremos unos resultados u otros, que analizados correctamente permitirán mejorar las condiciones de circulación del tren, o el grado de confort garantizado a los pasajeros.

El trazado requiere un estudio por separado en cada uno de sus componentes, a saber, el perfil en planta, el perfil longitudinal y el transversal:

*-Perfil en planta:* Se obtiene al proyectar sobre el plano horizontal el trazado seguido por el ferrocarril. Se compone de tramos rectos y tramos en curva circulares. Los puntos de transición entre recta y curva suponen un punto conflictivo en cuanto a propiedades constructivas, ya que en dicho punto, por comenzar la curva, es necesario un peralte, sin embargo, al formar parte también de la recta, dicho elemento resulta innecesario. [6]

La manera de evitar este problema pasa por añadir una curva cuyo radio sea variable. De esta forma, se introduce gradualmente el peralte y también se evita el cambio brusco de fuerza centrífuga. De todos los tipos de curvas de transición, la más utilizada para resolver este problema es la clotoide o radioide de arcos, que aumenta su radio linealmente con la longitud de la curva y cuya expresión y representación son las siguientes:



**Figura 2.3 Espiral de Cornu o Clotoide**



$$l \cdot \rho = \frac{1}{K}$$

Donde  $l$  es la longitud de la curva,  $\rho$  es el radio instantáneo de la curva y  $K$  una constante de proporcionalidad.

*-Perfil longitudinal:* Comprende el tramo contenido en el plano vertical, de manera que para su desarrollo se recogen las diferentes alturas sobre el nivel del mar a las que circula el tren, que se unen mediante trayectos inclinados llamados rasantes y en los puntos de transición mediante curvas denominadas acuerdos. Las rasantes se expresan en milímetros por metro, y pueden ser: “rampas”, si el tramo es ascendente, “pendientes” si el trayecto es descendente, y “horizontal” si no existe declividad. [6]

*-Perfil transversal:* Se trata del perfil que se forma al intersectar un plano vertical con la plataforma que contiene al eje del proyecto. Existen varios tipos de perfiles transversales, y cada uno de ellos requiere una operación distinta. Por ejemplo, las trincheras requieren una retirada de tierra, mientras que los terraplenes necesitan ser rellenados con material para poder nivelar el terreno. [6]

## 2.2 Superestructura

Se incluye dentro del concepto de superestructura desde la vía física sobre la que circula el vehículo, hasta todos aquellos elementos de seguridad que permiten una correcta circulación del ferrocarril. La vía propiamente dicha, será explicada en el siguiente apartado, por lo que en estos párrafos solamente se resumirán los aspectos más importantes del resto de componentes de la superestructura:

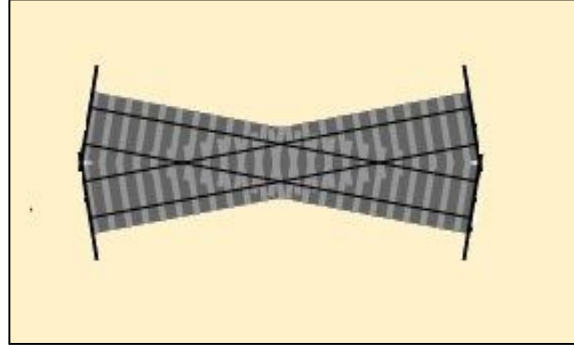
*-Aparatos de vía:* Comprenden todos aquellos elementos que posibilitan el desdoble de los carriles. Esta operación en concreto se realiza mediante unas herramientas llamadas “aguja”. Dicho instrumento está compuesto por una parte fija, llamada corazón, y por una parte móvil, denominada espadín. Según el tipo de desdoble que realicen, existen diferentes tipos de aparatos de vía, como los “desvíos”, que dividen la vía en dos y del cual existen muchas variedades según la velocidad máxima de la vía, o si es necesario realizar un cambio de ancho de vía. En este último caso se realizan desvíos mixtos.



Las travesías, por otra parte, posibilitan que dos vías se crucen tanto de manera oblicua como perpendicularmente sin que esto incurra en una pérdida de continuidad de dirección de ninguna de las dos vías.



**Figura 2.4 Desvío**



**Figura 2.5 Travesía**

-*Cambios de aguja*: Son aquellos elementos que permiten controlar la movilidad de las agujas para habilitar los cambios de vía. Existen “eléctricos”, que se accionan desde la estación o desde el centro de control de tráfico, “mecánicos”, controlados desde la estación a través de un cable de acero, o “manuales”, que se activan a pie de vía.

-*Señales*: El sistema de señalización es una parte imprescindible para la correcta circulación de los ferrocarriles. El método actual para llevar a cabo la señalización consiste en el “cantonamiento”. [6] Esto consiste en dividir la vía en secciones, llamadas “cantones”, de manera que por cada cantón solo pueda circular un único vehículo simultáneamente. De este modo, la señalización obligaría a pararse a un tren si va a entrar en un cantón en el que ya existe un vehículo, para así permitir una explotación eficiente de la vía ferroviaria compatibilizada con la seguridad. Los distintos elementos para transmitir la información necesaria a la cabina de mando se dividen en los siguientes tipos:

- Señales semafóricas: Se activan a través de un cable de acero.
- Señales luminosas: Son eléctricas y muy similares a los semáforos de carretera.
- Portátiles: Son de pequeño tamaño y las puede realizar el personal en cualquier momento.

---

·De limitación de velocidad: Regulan la velocidad máxima de circulación para cada tramo.

## 2.3 La vía

En los párrafos siguientes se abordarán aquellos elementos que conforman el material sobre el que circula directamente el vehículo ferroviario.

Básicamente, se define como vía todos aquellos elementos que conforman el camino de rodadura de los ferrocarriles. Sus dos funciones más importantes son el guiado del vehículo, y la sustentación de las cargas que el mismo confiere a la vía. Las principales características que permiten a la vía cumplir su cometido son: una ligera flexibilidad, que compense la naturaleza rígida del contacto rueda carril, y por otra parte, debe existir una continuidad en el trazado, de manera que debe tenerse en cuenta la dilatación térmica del metal. [6]

La vía se compone por la plataforma, que es el terreno base, las capas de balasto, y encima de ello, las traviesas. Encima de todos estos elementos de asentamiento se sitúan los carriles. A continuación se explican con más detalle todos estos componentes.

### 2.3.1 La plataforma

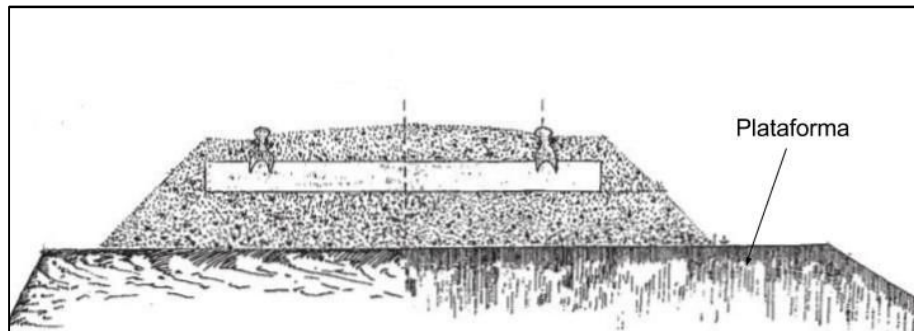
La plataforma es el elemento que soporta en última instancia todas las cargas que genera la circulación del vehículo ferroviario. Dichos esfuerzos son transmitidos a través de la capa de balasto. La estructura de la plataforma debe estar de la rigidez necesaria para evitar cualquier deformación que influya de manera negativa en el trazado de la vía, o en las propiedades que permitan un correcto funcionamiento del tramo en servicio.

Las principales funciones de la plataforma son las siguientes:

- Funcionar como estructura de apoyo.
- Resistir todos los esfuerzos, tanto estáticos como dinámicos, a los que se ve sometida la vía.

-Impedir que se deforme la vía.

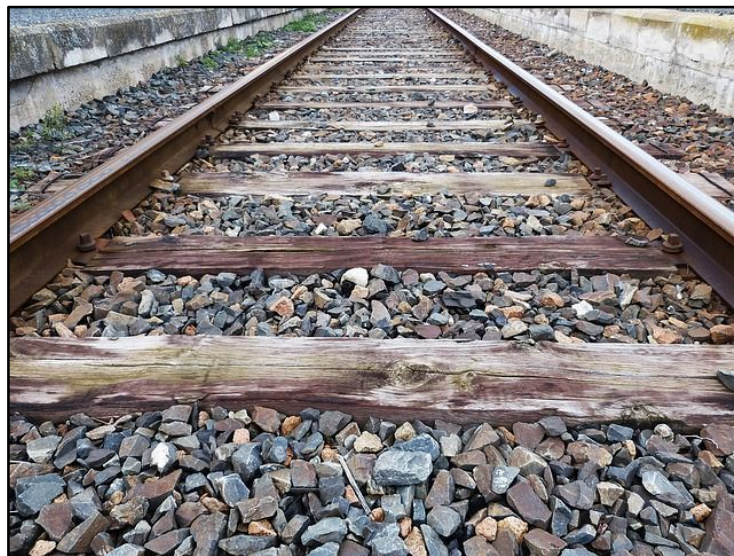
-Por último, también tiene un importante papel en el drenaje de aguas, evitando la formación de arcillas y otros residuos nocivos para la estructura. [6]



**Figura 2.6 Plataforma**

### 2.3.2 El balasto

Es el componente principal de las capas de asiento y de las capas de subbase. Se trata de un material granular situado bajo la traviesa cuyo objetivo es repartir las cargas sobre una superficie mayor. Habitualmente su tamaño suele estar entre los 25 y los 60mm, y es importante que tengan aristas vivas, forma poliédrica, y sean muy resistentes al desgaste.



**Figura 2.7 Capas de asiento**

---

Gracias a este elemento se obtienen las siguientes funciones:

- Aliviar las tensiones recibidas por las traviesas al aumentar la superficie que soporta las cargas provocadas por la circulación del vehículo ferroviario.

- Dada su naturaleza pseudoelástica, es capaz de amortiguar las vibraciones debidas al paso del ferrocarril.

- Consolidar la vía en todas las direcciones.

- Mejorar el confort experimentado por el pasajero.

- Contribuir a la evacuación de aguas, sirviendo como apoyo a la función de la plataforma.

- Permite recuperar de una manera más sencilla las características geométricas requeridas por la vía.

Además de las capas de asiento, también es necesario la inclusión de una capa de subbase en esta estructura, cuyo principal objetivo es potenciar las funciones obtenidas con la capa inicial, y que suele estar compuesta por gravilla arenosa compacta.

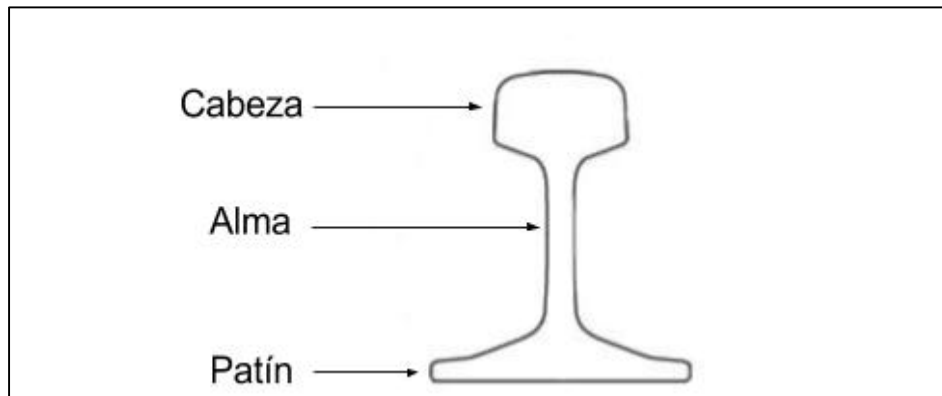
### 2.3.3 El carril

Se trata del elemento metálico que recibe directamente el contacto con las ruedas del ferrocarril. Sus tres funciones básicas son la sustentación de las cargas verticales, longitudinales y transversales, el guiado del vehículo para poder completar la trayectoria prevista y la conducción de la corriente eléctrica para señalización y alimentación del motor.

Para hacer posible el cumplimiento de estas funciones, el carril debe poseer con características tales como una buena resistencia a flexión y a la abrasión, una buena tenacidad y ser un buen conductor eléctrico.

Actualmente la geometría constructiva del carril sigue los estándares establecidos por el conocido como “carril de Vignole”. [6] Se trata de un carril de patín plano, cuya

distribución másica es un 35-40% en la cabeza, un 22-27% en el alma, y un 38% en el patín.



**Figura 2.8 Carril ferroviario**

A la hora de estandarizar el perfil del carril, se utiliza como designación un acrónimo que hace referencia a la administración u organización encargado del diseño del carril. Actualmente, los carriles más utilizados son UIC-54 y UIC-60, cuyo número hace referencia a los kilogramos que pesa el mismo por metro de longitud.

### 2.3.4 Las traviesas

Se trata de aquellos elementos destinados a fijar los carriles, dando una mayor estabilidad ante la circulación del vehículo ferroviario. Dichos travesaños se encuentran embebidos en el balasto.

Aunque inicialmente el material constructivo de estos componentes era exclusivamente madera, a partir del Siglo XIX comenzaron a explorarse otras alternativas, como traviesas metálicas huecas abiertas por su parte inferior. Más adelante se trató de fabricar traviesas de hormigón, que inicialmente dieron unos resultados peores de lo esperado, dada la incapacidad de este material para trabajar a tracción. Para solucionar este problema, se diseñó una estructura de traviesa bibloque, consistente en una traviesa con extremos de hormigón unidos por un perfil de acero, de modo que el hormigón no trabaje a tracción.

Finalmente, en la actualidad, se opta habitualmente por el uso de traviesas monobloque de hormigón armado, sometiendo la estructura a una compresión inicial, de



manera que al resistir los esfuerzos ejercidos por el ferrocarril, solo se reduzca el nivel de compresión, sin llegar a trabajar nunca a tracción.

Por último, cabe dar una idea general acerca del método de sujeción y apoyo del carril sobre las traviesas. El apoyo del carril se realiza haciendo una entalladura sobre la traviesa, con una ligera inclinación hacia el interior de la vía. Para fijar mejor el patín a la traviesa y limitar los desplazamientos que pueda sufrir se emplean tirafondos.

## 2.4 Material rodante

Constituye el principal objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado unido a las irregularidades en la vía. Se define como todos aquellos elementos que pueden circular sobre las vías.

Principalmente se diferencia entre material motor, el cual es todo aquel que es capaz de autopropulsarse, o material remolcado, que requiere de la fuerza de tracción del primero para desplazarse. Entre los primeros se encuentran elementos como el “material tractor”, capaz de traccionar a otros vehículos, pero incapaz de transportar carga útil, o el “vehículo automotor”, similar al primero, con la salvedad de que es apto para el transporte de carga sobre sí mismo. En el segundo grupo, la subdivisión se realiza en base al tipo de carga útil que está destinados a transportar el vehículo.



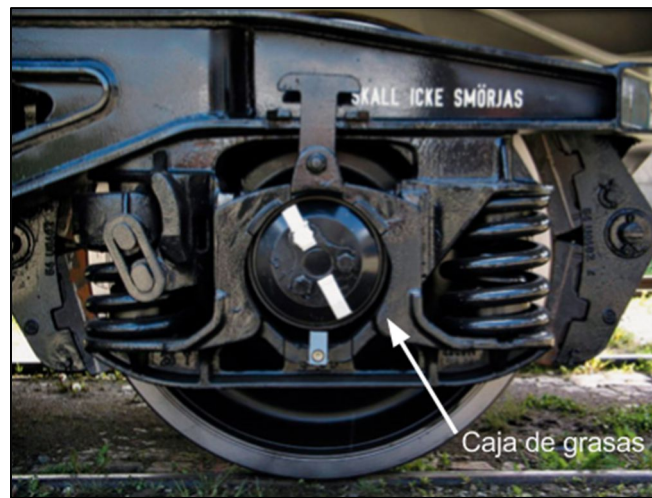
**Figura 2.9 Locomotora de vapor y coches**

Los trenes también se clasifican según el tipo motor que lleven, habitualmente diésel o eléctricos, y por el tipo de trayecto que deben realizar. En este caso concreto, el modelo objetivo tendrá bastantes similitudes con un tren regional de pasajeros, cuyas características principales son un recorrido máximo de 200 kilómetros, un uso habitual de vehículos automotores y cajas tanto de acero como de aluminio. El modelo se explicará más en profundidad en los capítulos dedicados a las simulaciones.

## 2.4.1 Material remolcado

En este subcapítulo se dará una visión general de todos los conceptos claves para entender la importancia de los coches y vagones dentro del entorno ferroviario.

La estructura principal de este tipo de vehículos se basa en una caja solidaria a un bastidor o a un autoportante. Dicho elemento se enlaza a los ejes por medio de los rodamientos contenidos en las cajas de grasas, que además cuentan con un sistema de amortiguamiento para subsanar todos los choques debidos a factores de cualquier índole, como puedan ser irregularidades en la vía. [6]



**Figura 2.10 Caja de grasas**

A su vez, la caja está compuesta por varios grupos, que se enumeran y comentan a continuación. Dichos componentes son el bastidor, que conforma la estructura inferior del coche o vagón, los laterales de la caja, los testeros, equivalentes a los laterales pero en la parte delantera y trasera y el techo o cubierta.

Otra de las partes importantes de estas estructuras es el nexo de unión entre vehículos. Dicho enlace consiste en un conjunto de enganches, barras, resortes y topes que permiten la continuidad del vehículo ferroviario. Cabe destacar que en vehículos de pasajeros, aparte de dichos elementos, se añade una unión superior a la altura de la caja, de manera que habilita el tránsito de pasajeros entre coches.

En cuanto a la conexión existente entre la caja y el mecanismo de rodadura, en este caso los ejes, se distinguen las dos siguientes configuraciones:

*-Material rígido:* Tanto la caja como el bastidor se sustentan sobre dos o más ejes paralelos embebidos en el bastidor.

*-Material articulado:* Esta configuración se sigue en vehículos con bogies, en cuyo caso la caja reposa sobre dicho elemento por medio de pivotes. Cada bogie podría conformar por sí mismo un vehículo independiente. [6]

## 2.4.2 El bogie

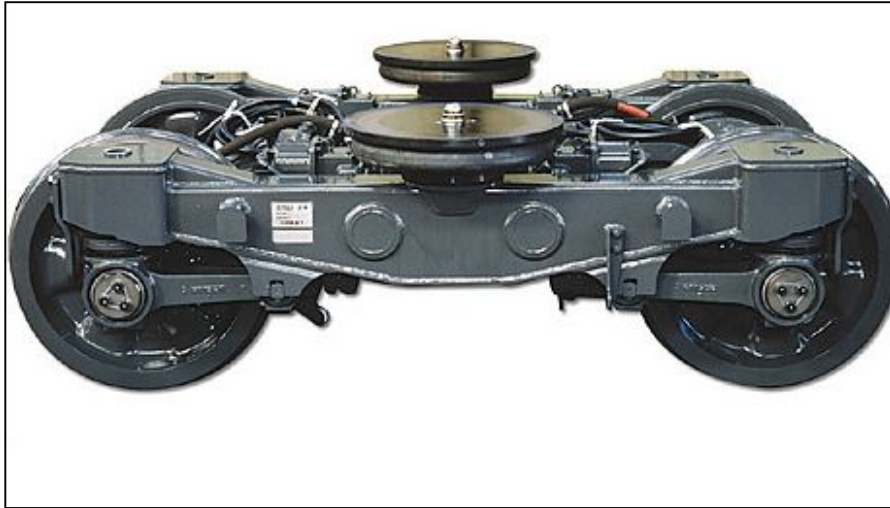
Se denomina como bogie aquella estructura que se encuentra bajo la caja o el vagón y cuya función principal es hacer posible la rodadura del vehículo y sostener toda la masa suspendida del mismo. Existen dos tipos de bogies: bogie motor, si incorpora motores que le permiten autopropulsarse, o bogie remolcado, si requiere ser traccionado por otro elemento independiente. Las estructuras de los segundos son significativamente más ligeras y sencillas, por lo que a continuación se exponen todos los elementos que componen un bogie motor:

*-Bastidor:* Se trata de un esqueleto con forma de “H” cerrado por los extremos por traviesas transversales. Está fabricado con chapas soldadas, y su finalidad es hacer las veces de base para montar el resto de componentes que conforman el bogie. Este elemento es el que está en contacto con las cajas de grasa, que establecen el nexo con los ejes de las ruedas. Esta unión se realiza a través de la suspensión primaria.

*-Ejes y ruedas:* Su nombre es representativo de su utilidad. Cada bogie cuenta con dos ejes y ruedas, pudiendo tener hasta cinco, si la carga transportada es demasiado elevada.



-*Reductores*: Se trata de un sistema de engranajes cuya función es la variación del par motor transmitido por el motor, y a su vez permitir adecuar la velocidad lineal del tren, reduciendo el número de revoluciones por minuto que llegan al eje, ya que los motores funcionan adecuadamente a revoluciones cuyo equivalente en velocidad lineal del vehículo sería poco seguro.



**Figura 2.11 Bogie**

-*Suspensiones*: El bogie es el encargado de albergar los dos tipos de suspensiones con los que cuenta el ferrocarril: la suspensión primaria, que amortigua las vibraciones entre el bogie y las ruedas, y la secundaria, cuya función es “estabilizar” la unión entre la masa suspendida y el bogie.

-*Frenos*: El sistema de frenos de los ferrocarriles se conforma por una combinación entre freno motor o eléctrico, en el cual el motor alterna su función y se comporta como un generador, de manera que ofrece resistencia, y un motor neumático, el cual funciona mediante la aplicación de presión neumática. Al combinar estos dos sistemas es posible regular mejor la situación de freno, de manera que se obtiene un frenado igualado en todos los vehículos de los que consta el sistema. En caso de frenada de emergencia se recurre en primer lugar al freno neumático, ya sea por un imprevisto en el trayecto, o porque se active el dispositivo de hombre muerto, que es aquel que controla que el maquinista siga consciente durante el trayecto, obligándole a pulsar un botón cada cierto tiempo. [6]

---

*-Elementos auxiliares:* Como cualquier elemento de cualquier sistema, los bogies cuentan con ciertos elementos auxiliares que facilitan el funcionamiento del mismo, o hacen más sencillo su mantenimiento. Estos componentes pueden ser desde balizas hasta dispositivos de limpieza del bogie.

## Capítulo 3

# Herramientas informáticas

A lo largo de este capítulo se expondrán todos los pormenores relativos al software de apoyo utilizado para la realización de este proyecto. De este modo, el capítulo se divide en dos subcapítulos principales, de los cuales el primero versará sobre el software de simulación ferroviaria “Universal Mechanism”, con el cual se obtienen los datos del experimento, y donde se expondrán todas las posibilidades que permite el simulador, además de una comparativa con otros softwares comerciales de simulación, y el segundo sobre Matlab, que sirve como procesador de datos, y donde se expondrá una presentación del programa y sus múltiples utilidades y se adjuntará el código utilizado para obtener la densidad espectral de potencia. Del mismo modo, se realizará en dicho capítulo una breve explicación teórica acerca del concepto “Densidad espectral de potencia”.

También se utiliza Excel para tratar de manera más dinámica los datos puntuales obtenidos de las gráficas generadas por Matlab, pero no es necesario un subcapítulo dedicado a dicho software, ya que su función se limita a la creación de gráficas a partir de puntos sencillos.

### 3.1 Universal Mechanism

Universal Mechanism es un programa CAE, es decir “Computer Aided Engineering” o ingeniería asistida por computadora, que permite la simulación de sistemas tanto planares como espaciales en experimentos cinemáticos o dinámicos. El programa está dirigido del mismo modo a profesores y alumnos para resolver problemas de cualquier índole del sector. Este programa pertenece al proyecto del laboratorio de computación mecánica de la “Bryan State Technical University” de Rusia. En concreto, para la realización de este proyecto se ha empleado la versión 8.0.5.1 del software, obtenido a través de la página web el día 8 de Febrero de 2017. [7]

El programa utiliza un modelado de sistema multi-cuerpo para resolver este tipo de problemas, dividiendo los cuerpos en sólidos rígidos unidos por pares cinemáticos y fuerzas. El simulador también hace posible llevar un control de multitud de variables durante la realización del experimento y al final del mismo. Así mismo, tras la obtención de los resultados deseados, es posible realizar un procesamiento de los datos, mediante métodos como regresiones lineales, análisis estadísticos, o estudios de durabilidad. Esto convierte a Universal Mechanism en un software ideal para aplicaciones como el cálculo de estructuras en el sector aeroespacial, simulaciones de sistemas ferroviarios o automóviles etc.



Figura 3.1 Logo Universal Mechanism [7]

El programa está dividido en varios módulos que se aplican en función de la finalidad con la que se use el programa. En este caso, el módulo a emplear se llama UM Loco, que se explicará en profundidad más adelante junto con una breve introducción al resto de módulos que ofrece Universal Mechanism. El desarrollador ofrece el programa

en varios paquetes dependiendo del uso que sea requerido. En este caso, ha sido posible realizar el proyecto con una licencia educativa que proporciona acceso al programa completo durante 6 meses.

Este software de simulación resuelve los problemas utilizando como base técnicas modernas de modelado para resolver sistemas simulados por ordenador, incluyendo también métodos propios de los desarrolladores, como puede ser el método Park para resolver de manera directa ecuaciones algebraicas y diferenciales rígidas del movimiento. Del mismo modo, usan otros métodos modificados como el “Adams-Bashfort-Moulton” y BDF o “Black Differentiation Formula” para resolver ecuaciones de todo tipo no rígidas del movimiento, y usan formalismos encaminados a acelerar el proceso de cálculo. Gracias a estas herramientas Universal Mechanism hace posible mejorar la efectividad durante acciones como el modelado o la introducción de datos. [8]

### 3.1.1 Estructura de Universal Mechanism

El simulador se divide en dos subprogramas principales, aparte de todos los módulos con los que cuenta, que se explicarán más adelante. Dichos programas se llaman UM Simulation y UM Input, cuyas funciones son la simulación propiamente dicha, o la introducción de datos y el modelado respectivamente.

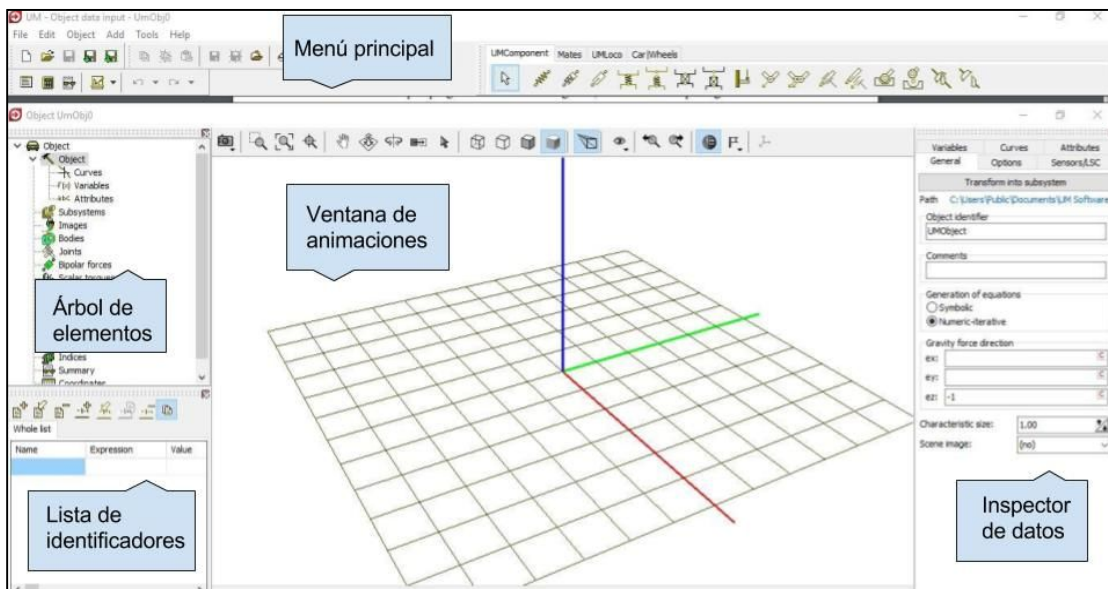
*-UM Input:* Se trata del primer programa a utilizar en caso de que nuestro objetivo sea el modelado de un sistema desde cero. Consiste en un software CAD (Computer Aided Design) cuya finalidad es permitir al usuario llevar a cabo el diseño de un sistema con todas sus características desde cero, de manera previa a iniciar la simulación en cualesquiera que sean las condiciones requeridas por el experimento a realizar. En este proyecto, concretamente, será necesaria la modificación de uno de los modelos proporcionados por Universal Mechanism para introducir cajas de grasas en el mismo, pero este proceso se explicará en capítulos posteriores, concretamente en el capítulo que abarque el experimento número dos. [9]

Dicho módulo cuenta con cinco apartados principales:

- Menú principal: Se trata de la ventana superior, y habilita al usuario para acceder a todas las aplicaciones de las que dispone el programa. También incluye una barra de herramientas con accesos rápidos a todas las herramientas de las pestañas superiores y a todos los módulos que incluye el programa.

- Árbol de elementos: En esta ventana se encuentran todos los elementos de los que se compone el modelo a diseñar, o en su defecto, a modificar. De este modo, en este apartado se incluyen varias pestañas con acceso a todos los cuerpos rígidos de los que dispone el modelo, a todos los elementos gráficos incluidos en el mismo, al igual que a todas las fuerzas de ligadura o pares cinemáticos que rigen las interacciones del sistema multi-cuerpo. [9]

- Lista de identificadores: Este apartado contiene todos aquellos datos que deban introducirse en el modelo, es decir desde la masa de uno de sus componentes hasta la rigidez de algún muelle del que disponga. De la misma manera, se pueden modificar todos estos parámetros, que pueden ser introducidos desde la propia ventana o añadidos automáticamente desde el “Inspector de datos” que se explicará más adelante en este capítulo.



**Figura 3.2 Interfaz UM Input**

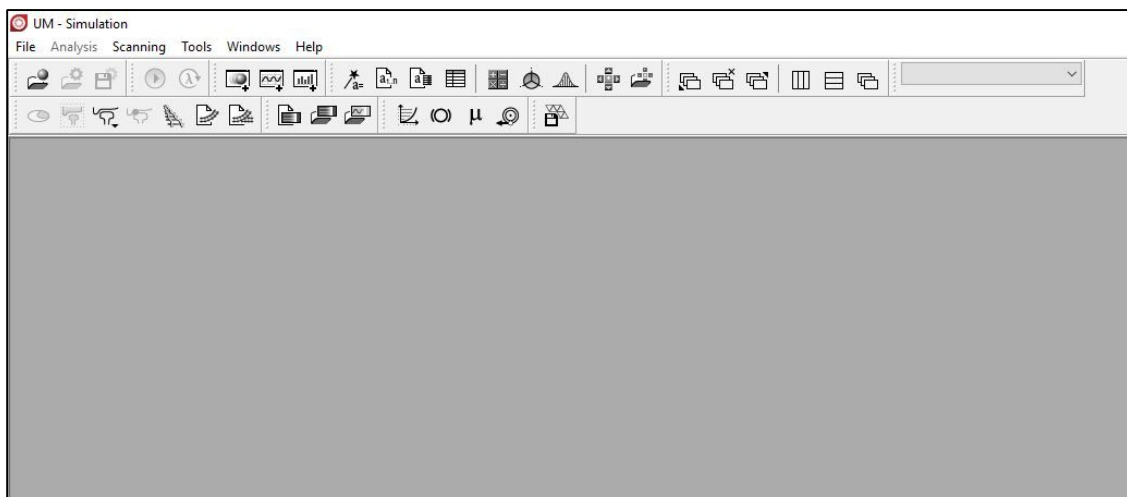
- Ventana de animaciones: Como su propio nombre indica, se trata del elemento visualizador de gráficos del que dispone el programa. En dicha ventana se pueden

observar todos aquellos elementos gráficos que hayan sido añadidos al modelo, así mismo como el sistema de coordenadas. En la parte superior de esta ventana existe una barra de herramientas que permite configurar la visualización del sistema.

·Inspector de datos: Se trata del verdadero centro neurálgico del programa, ya que desde dicho apartado es posible gestionar todos los elementos que se pueden añadir al sistema, desde los elementos gráficos hasta los cuerpos rígidos, pasando por todos los atributos que caracterizan a cada uno de ellos. También es posible modificar desde aquí los sistemas de referencia que rigen cada uno de los componentes del modelo, y la posición de estos últimos.

-*UM Simulation*: Se trata del entorno informático dentro de Universal Mechanism dedicado a realizar el procesado y post-procesado de datos, es decir, dos de las funciones típicas de los programas CAE. Así pues, este programa permite resolver las ecuaciones del movimiento del modelo que haya sido cargado, integrando numéricamente por métodos iterativos dichas ecuaciones. También permite el cálculo de posiciones de equilibrio y análisis lineales.

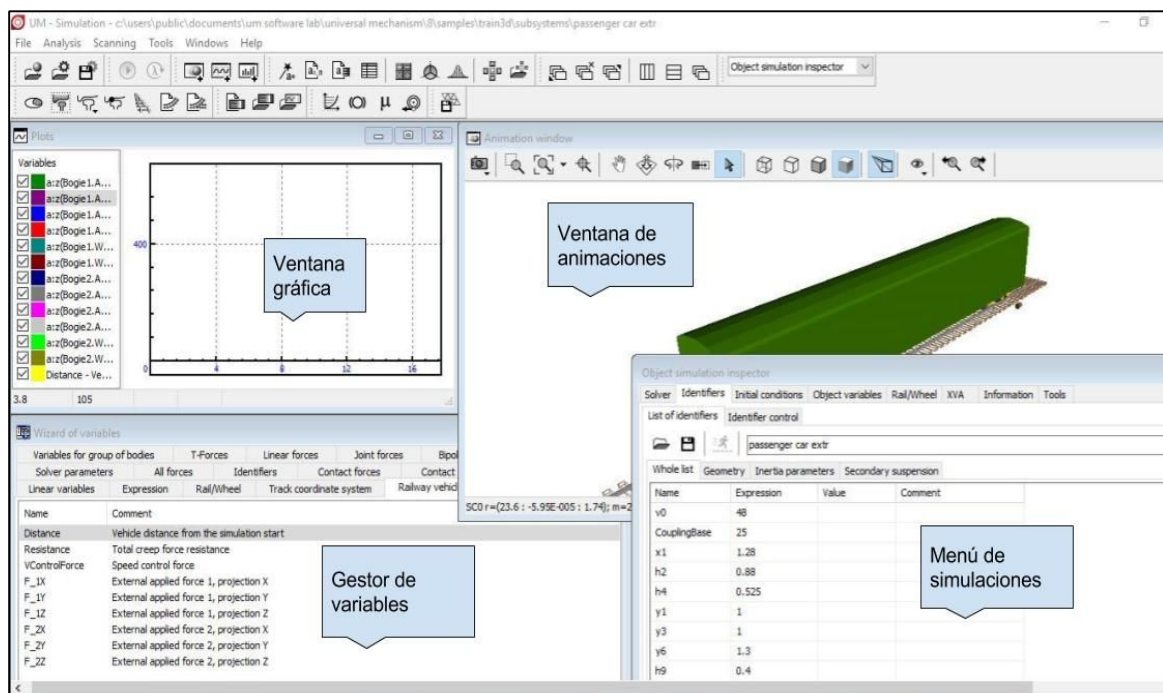
En los siguientes párrafos se explican todos los apartados de los que dispone la interfaz del programa, incidiendo más a fondo en las utilidades necesarias para la realización de este proyecto. En la foto inferior se presenta la interfaz del menú previamente a la apertura de ningún modelo.



**Figura 3.3 Interfaz inicial UM Simulation**



La interfaz básica cuenta con las siguientes pestañas: “File”, en la cual es posible abrir todos los modelos disponibles e incluso elegir la configuración del mismo que interesa. La pestaña “Analysis” solo se puede usar una vez abierto el sistema, y es la que permite acceder a las herramientas de análisis y de simulación de las que dispone el software. A través de “Scanning” es posible realizar un barrido para analizar ciertos parámetros con una determinada configuración. En “Tools” se encuentran todas las herramientas de las que dispone el programa, desde la posibilidad de abrir una ventana gráfica o el gestor de variables (“Wizard of variables”) hasta crear un fichero de irregularidades en la vía y un perfil de carril. Finalmente, la pestaña “Windows” abre una ventana que permite navegar de manera más sencilla por las ventanas de trabajo abiertas y el menú “Help” permite acceder a todos los manuales disponibles para el autoaprendizaje del manejo del software. [10]



**Figura 3.4 Interfaz UM Simulation de trabajo**

En la imagen superior se encuentran las ventanas que aparecen una vez abrimos un modelo, el menú “Simulation” dentro de la pestaña “Analysis” y la ventana gráfica que posibilita llevar un control de las variables que deben ser analizadas. A continuación se expone una visión general de esta interfaz del programa, posponiendo la configuración de los parámetros para el capítulo dedicado a los experimentos propiamente dichos:



·Ventana gráfica: Consiste en una tabla lateral con todas las variables que van a ser monitorizadas en tiempo real durante el tiempo que se lleva a cabo la simulación, y dos ejes coordenados que muestran de manera visual la evolución de las mismas. También incluye un gestor con el que configurar la visualización de la gráfica.

·Gestor de variables: Dentro del programa este menú se llama “Wizard of variables” y posibilita el acceso a todas las variables que rigen el sistema y que a posteriori serán analizadas. Desde esta ventana se arrastran todos los parámetros que serán registrados hasta la ventana gráfica.

·Ventana de animaciones: Se trata del apartado del programa en el que se muestra de manera animada el movimiento que realiza el sistema a estudiar. En este caso, se observa el movimiento del tren a lo largo de todo el trayecto objeto de estudio.

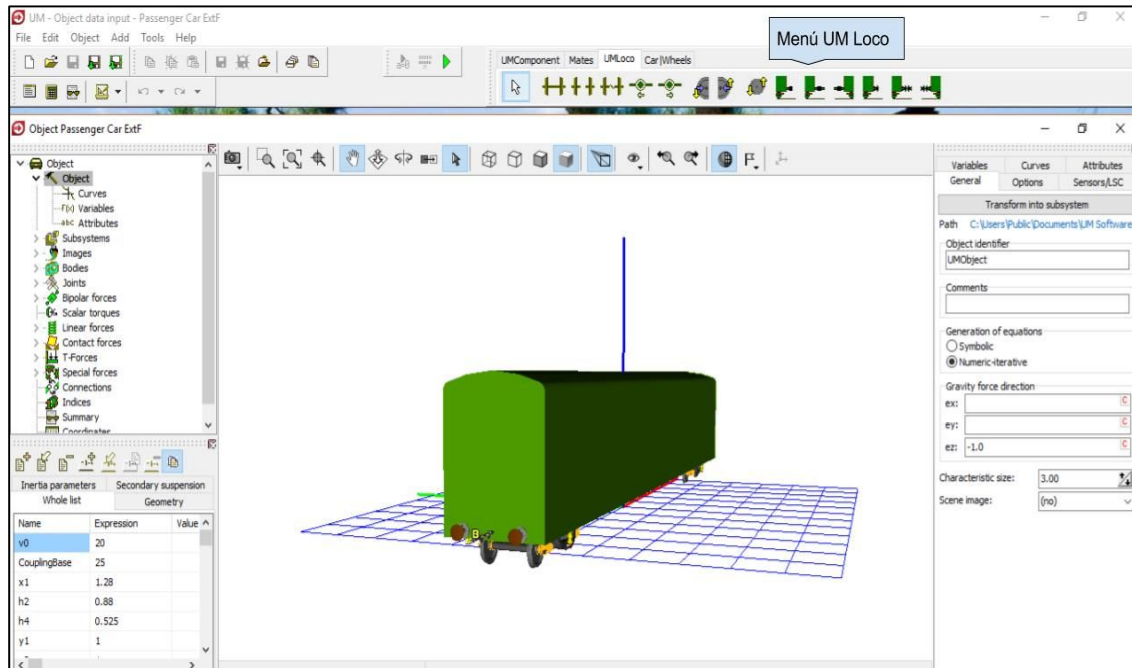
·Menú de simulaciones: Esta ventana es la más importante para el desarrollo de este proyecto, ya que en ella se seleccionan todos los parámetros configurables para la realización de la simulación. De este modo es posible elegir la frecuencia de muestreo de las variables monitorizadas, el “solver” que se empleará para la resolución de las ecuaciones diferenciales del movimiento y el error admisible para los datos registrados. Para este experimento, al tratarse de una simulación ferroviaria, también se seleccionan desde este menú las irregularidades de la vía, el trayecto, el perfil del carril o de la rueda además de la posibilidad de modificar algunos de los identificadores introducidos en “UM Input”, como la velocidad de desplazamiento del vehículo, o ciertos parámetros relativos al bogie y los ejes. [10]

### 3.1.3 Módulos de Universal Mechanism

Además de los dos programas principales necesarios para la resolución de este proyecto, Universal Mechanism incorpora varios módulos que facilitan la realización de experimentos en varios sectores, incluyendo herramientas que permiten la modificación de manera más sencilla de parámetros típicos en la resolución de cada tipo concreto de problema.

A continuación se exponen unos pocos de los múltiples módulos de los que dispone Universal Mechanism:

-*UM Loco*: Se trata de uno de los módulos principales que hacen posible la realización de este proyecto. Es un apartado cuyo objetivo es la simulación de todo tipo de vehículos ferroviarios, desde coches hasta locomotoras y pasando por trenes completos.



**Figura 3.5 Interfaz UM Loco, dentro de UM Input**

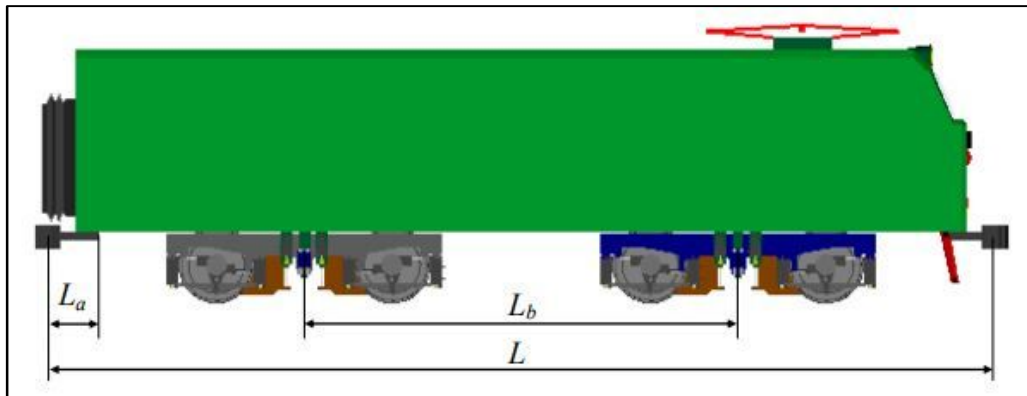
El módulo está destinado a la resolución en tiempo real de problemas de simulación de trenes por medio de ecuaciones diferencias o diferenciales algebraicas del movimiento. También posibilita la creación de modelos completamente parametrizados, siendo la parametrización una de las bases para la optimización de diseños. Las principales funciones que permite usar el módulo son las siguientes:

- Cálculo de la velocidad crítica del vehículo.
- Analizar en 3D el recorrido de un tren en curvas tangentes, y trayectos con o sin irregularidades.
- Analizar la dinámica de los vehículos en función de los perfiles de la rueda y del carril.

- Añadir vehículos independientes a otros modelos ferroviarios.
- Crear proyectos con el módulo “Scanning” para analizar el movimiento del vehículo en función de cualquier parámetro.
- Crear modelos rígido-elásticos de trenes.
- Cálculo de parámetros como frecuencias naturales. [11]

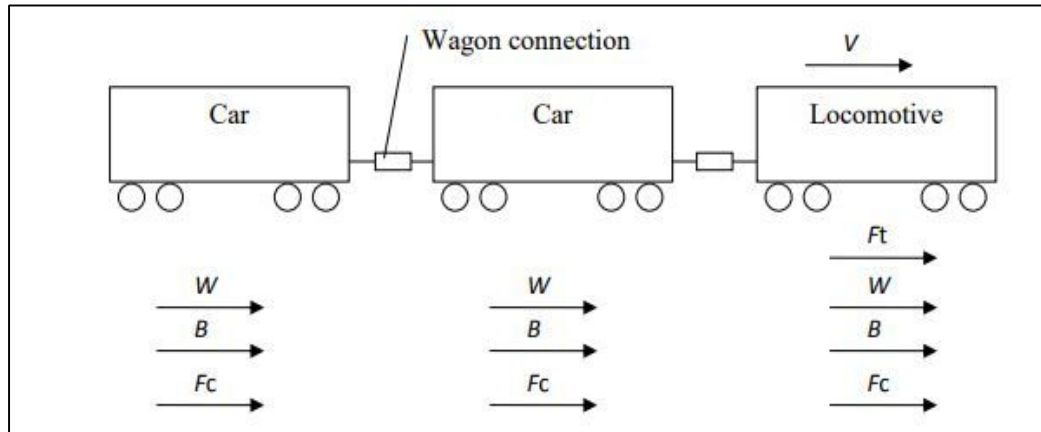
-*UM Train*: Se trata de un módulo enfocado a la automatización del proceso de simulación de cualquier vehículo ferroviario de cualquier tamaño. De esta manera, es posible realizar un experimento en cualquier situación del vehículo ferroviario, sea en tracción o en frenado. Sin embargo, los modelos en dicho software se encuentran bastante simplificados, teniendo uno o pocos grados de libertad, dependiendo de si se trata de un modelo 2D o 3D, lo cual permite la simulación de cualquier número de vehículos. [12]

El módulo UM Train incluye por defecto una base de datos bastante amplia con modelos de trenes rusos, los cuales se pueden implementar de manera combinada entre ellos para la creación de trenes más grandes. En las figuras inferiores se muestran de manera esquematizada los parámetros geométricos típicos a usar para la simulación, y el esquemático con las fuerzas de las que consta el modelo simplificado.



**Figura 3.6 Parámetros geométricos en una simulación 2D [12]**

En la imagen superior, los parámetros indicados son los siguientes:  $L_a$  es la mitad del nexo de la longitud del nexo de unión entre vagones,  $L_b$  es la base del bogie y  $L$  es la longitud del tren desde sus extremos en los acoplamientos.



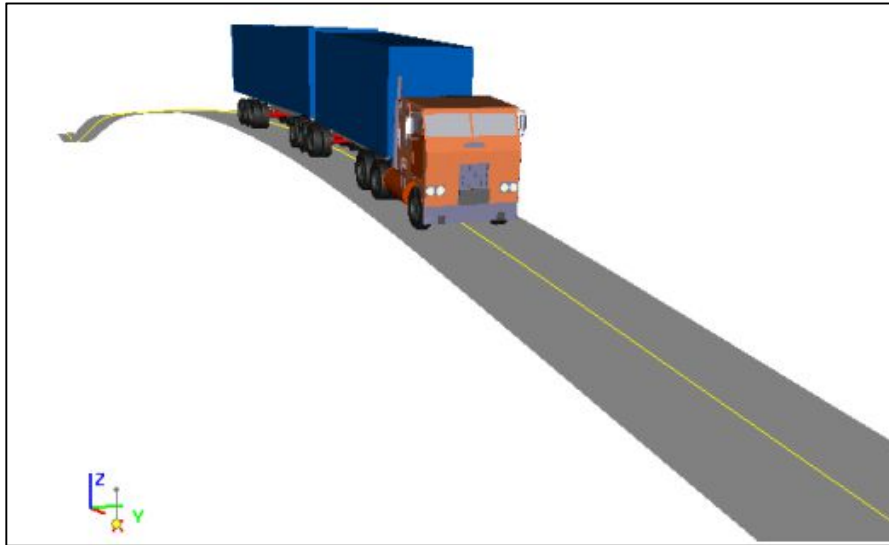
**Figura 3.7 Flujo esquemático de fuerzas [12]**

Por otra parte, las abreviaturas señaladas en la Figura 3.7 representan lo siguiente:  $F_c$  es la fuerza en los ganchos,  $F_t$  es la fuerza de tracción o frenado,  $B$  es la fuerza neumática de frenado y  $W$  es la fuerza total de resistencia al avance.

-*UM Automotive*: Es el último de los módulos que serán expuestos en este resumen. A pesar de no estar ligado a la realización de este proyecto, resulta interesante que sea brevemente resumido, dada la importancia de dicho subprograma, además de que permite resaltar la versatilidad del software de simulación Universal Mechanism.

El módulo “Automotive” se incluye por defecto en el paquete básico de Universal Mechanism, y está enfocado a la resolución de problemas y análisis de la dinámica de los vehículos automóviles. De este modo, la aplicación incluye librerías con elementos típicos de suspensión o cajas de cambios. Por lo tanto, el programa permite al usuario la obtención de los siguientes objetivos [13]:

- Estimación de vibraciones en el vehículo debidas a irregularidades en la calzada.
- Estimación del comportamiento dinámico del vehículo en la realización de varios tipos de maniobras.
- Optimización del diseño del vehículo automóvil por medio de la parametrización.
- Análisis de la importancia de la transmisión en la estabilidad y el manejo del vehículo. [13]



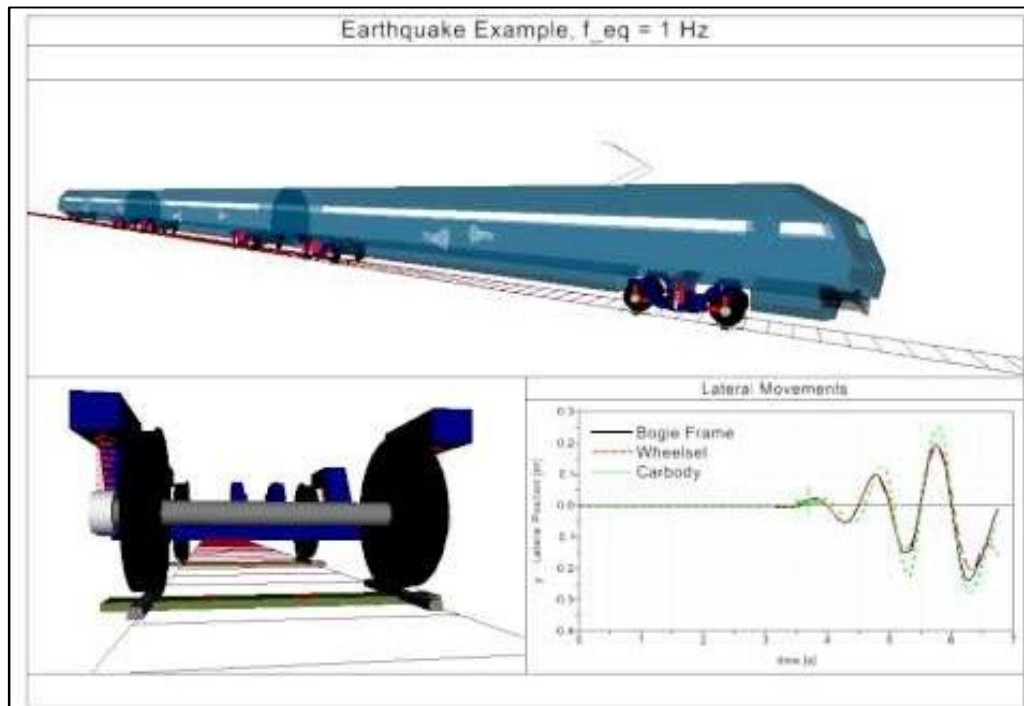
**Figura 3.8 UM Automotive**

### 3.1.4 Alternativas comerciales a Universal Mechanism

En el siguiente apartado se aporta una visión general de algunas de las aplicaciones de simulación ferroviaria más importantes que es posible encontrar en el mercado. Del mismo modo, tras exponer las alternativas comerciales a Universal Mechanism, se realizará una breve reflexión aportando los principales motivos por los que se ha elegido dicho simulador:

-*SIMPACK*: Es una aplicación desarrollada por Dassault Systems que, al igual que Universal Mechanism, contiene una gran cantidad de módulos que posibilitan la resolución sencilla de problemas en muchos sectores de la ingeniería, incluido el ferroviario. [14]

Se trata de un simulador muy completo que permite el diseño completo de cualquier vehículo con un guiado por carril, desde los coches de las montañas rusas hasta trenes de alta velocidad. Como casi todos los softwares en el mercado, es un simulador basado en sistemas multicuerpo y está enfocado principalmente al estudio de altas frecuencias en régimen transitorio.



**Figura 3.9 Interfaz Simpack**

Sus principales ventajas son las siguientes:

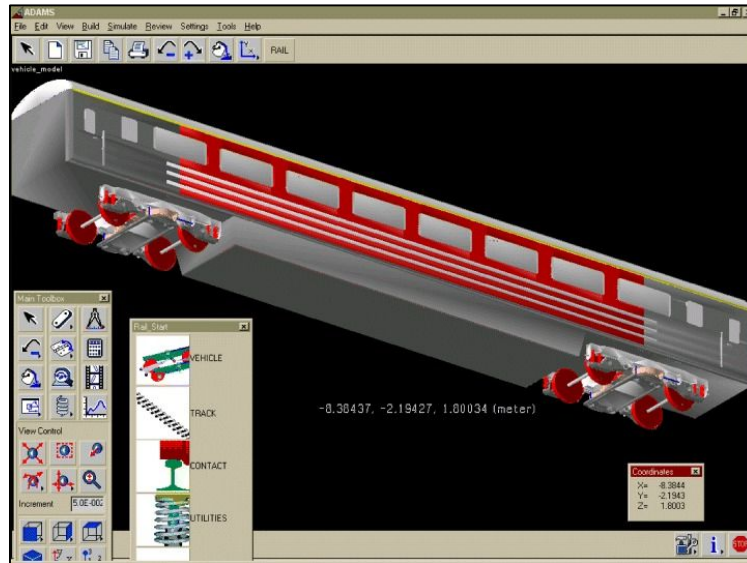
- Flexibilidad total para la realización de cualquier tipo de proyecto.
- Facilidad para la adición de vehículos al modelo de tren completo.
- Cada rueda se trata de forma independiente.
- Permite el análisis del contacto rueda carril.

Todas estas características convierten a Simpack en una alternativa muy atractiva para la realización de este proyecto.

-*MSC Adams*: Este simulador del sector ingenieril está enfocado para ayudar a profesionales a entender las fuerzas existentes y su distribución en una gran variedad de mecanismos, y en sistemas multicuerpo. De este modo, permite la reducción de costes en las etapas tempranas de diseño, no siendo necesaria la fabricación de prototipos sin ningún dato inicial, por ensayo y error. Este programa está optimizado para problemas de gran envergadura.

Adams, cuyo significado es “Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems”, consta de una gran variedad de módulos dedicados al análisis de vibraciones,

esfuerzos, análisis de durabilidad, por medio de simulaciones que van acompañadas de un entorno de visualización gráfico. [15]



**Figura 3.10 Entorno de simulación Adams Rail**

El módulo destinado al análisis de sistemas ferroviarios se llama “Adams Rail” y se trata de una división dentro de la aplicación Adams Car. El programa Rail no se distribuye de manera comercial en la actualidad, tan solo está disponibles para versiones anteriores, como Adams 2005. Entre las posibilidades que brinda este programa destacan el análisis de vibraciones durante la circulación del vehículo ferroviario, tanto en ruedas como en el bogie, la predicción de los esfuerzos sobre la vía o el análisis del confort para los pasajeros.

-*Vampire*: En este caso se trata de un programa destinado específicamente a la resolución de problemas del entorno ferroviario. Se trata de una aplicación desarrollada por la compañía llamada inicialmente Delta Rail Group, y que a partir de 2016 es conocida como Resonate Group Limited, en reconocimiento a la nueva era de transportes conectados e inteligentes en la que estamos entrando. [16]



**Figura 3.11 Logos Resonate Group Limited y Vampire**



Por medio de este programa, es posible trabajar con modelos dinámicos de cualquier tipo de vehículo guiado por carriles, y de este modo, estudiar la respuesta de dichos modelos ante geometrías de trayectos reales o cualquier tipo de fuerzas introducidas por el usuario, teniendo un control total sobre la gran mayoría de parámetros característicos del tren. La versión utilizada actualmente es la actualización V6.50, que fue comenzó a ser distribuida el 28 de Junio de 2017. [17]

Entre las utilidades más destacadas de Vampire se encuentran el análisis de fatiga de los carriles, el estudio de la dinámica del tren con el fin de investigar lo sucedido en situaciones como puede ser un descarrilamiento, la posibilidad de analizar el impacto de realizar un nuevo diseño o sencillamente equilibrar mejor el reparto de cargas a la hora de soportar las fuerzas generadas durante la circulación del vehículo ferroviario. Vampire además cuenta con una gran ventaja, que es la gran colaboración de desarrolladores, por lo que cuenta con una gran base de datos reales.

Por último, una vez expuestos una gran cantidad de las alternativas comerciales a Universal Mechanism, solo queda realizar un breve análisis acerca de los motivos para la elección de dicha aplicación. Dichos motivos son los siguientes:

- La posibilidad de contar con una aplicación específica dentro del programa para la fácil modificación de los parámetros principales en las simulaciones.

- También cabe destacar la gran cantidad de librerías enfocadas a la simulación ferroviaria con los que cuenta el software, desde datos relativos a la infraestructura y superestructura ferroviaria pasando por el abundante número de modelos de los que dispone.

- La larga extensión del período de prueba de Universal Mechanism teniendo fines académicos, lo cual permite recrearse en el experimento y realizar simulaciones adicionales si procediera.

- El programa es relativamente nuevo, por lo que es conveniente realizar estudios con él y comprobar la veracidad de los resultados obtenidos con el mismo. De este modo, cada vez el modelo simulado guardará más parecido con los reales.



## 3.2 Matlab

Matlab es un lenguaje de programación enfocado al procesamiento de datos y al cálculo de operaciones propias de la ingeniería. El entorno de programación es propiedad de la compañía MathWorks y la última actualización disponible comercialmente es “Matlab R2017a”, en su versión 9.2, la cual fue lanzada el 8 de Marzo de 2017. Este entorno de programación suele comercializarse junto un simulador de diseño llamado Simulink, perteneciente a la misma compañía. [18]



**Figura 3.12 Logo de la compañía MathWorks**

De cara a la realización de este proyecto, el principal interés de Matlab reside en la facilidad de cálculo para procesar datos por medio de transformadas de Fourier, y la posibilidad de importar datos externos al código programado, lo cual permite un análisis rápido y sencillo de las densidades espectrales de potencia de los datos obtenidos en las simulaciones.

En resumen, las principales utilidades que ofrece este entorno de programación son la creación de un lenguaje de programación cercano al lenguaje de las matemáticas, la posibilidad de realizar operaciones algebraicas de todo tipo y la integración de manera natural del lenguaje matricial, lo cual resulta muy útil para cálculos de ingeniería. Por medio de estas prestaciones, Matlab se convierte en un lenguaje de programación idóneo para aplicaciones tales como el procesamiento de señales, el diseño de sistemas de control o la simulación de sistemas dinámicos.

### 3.2.1 Código usado para el procesamiento de datos

Para la realización del código se contó con el entrenamiento obtenido a lo largo de un curso introductorio de Matlab proporcionado por la propia web del desarrollador,

donde se inicia al usuario al análisis de datos por medio de este entorno de programación. Dicho tutorial se llama “Matlab Introducción” y puede encontrar en el siguiente enlace, aunque el sitio web requiere de un registro previo para poder disfrutar del contenido:

<https://matlabacademy.mathworks.com/es>

Una vez realizado dicho curso introductorio, se tienen las nociones básicas necesarias para poder confeccionar el código que permite el tratamiento de datos para su posterior análisis en forma de densidad espectral de potencia. A continuación se adjunta dicho código, con una breve explicación de cada una de las partes del código en los comentarios en verde. Este código corresponde al procesado de una única gráfica resultante, para obtener todas las gráficas habría que repetir esta misma estructura sobre otra de las columnas de la matriz de datos:

```
%En estos primeros párrafos se cargan archivos de un fichero '.txt'
%y se crea una matriz de datos que permitirá posteriormente crear las
%gráficas
importdata('ConFallos.txt');
t=ans(:,1);
AxleboxB1_WS1_L_CF=ans(:,2);
AxleboxB1_WS1_R_CF=ans(:,3);
WSet1_CF=ans(:,4);

AxleboxB1_WS2_L_CF=ans(:,5);
AxleboxB1_WS2_R_CF=ans(:,6);
WSet2_CF=ans(:,7);

AxleboxB2_WS1_L_CF=ans(:,8);
AxleboxB2_WS1_R_CF=ans(:,9);
WSet3_CF=ans(:,10);

AxleboxB2_WS2_L_CF=ans(:,11);
AxleboxB2_WS2_R_CF=ans(:,12);
WSet4_CF=ans(:,13);

%Código para obtener la densidad espectral de potencias
N=length (AxleboxB1_WS1_L_CF);
Incre_t=t(2)-t(1);
T=N*Incre_t;
Fs=1/Incre_t;
Incre_f=Fs/N;
f=Incre_f:Incre_f:Fs;
Y01=fft(AxleboxB1_WS1_L_CF,N);
Pyy1=Y01.*conj(Y01)/(N^2/2);

%En esta parte del código se genera una ventana con el comando figure
%y posteriormente se guarda dicha gráfica en formato '.fig' con el
%comando 'hgsave' para su posterior análisis
figure (10)
plot (f(1:(N/2)),Pyy1(1:(N/2)));
```

```
ylabel('AxleboxB1_WS1_L_CF');  
xlabel('f(Hz)');  
a=figure(10);  
hgsave(a,'AxleboxB1_WS1_L_36');
```

De este modo, con la adición del último párrafo al programa, solo sería necesaria la ejecución del mismo una única vez, el resto de veces se trabajaría sobre los archivos '.fig' generados. La regla para el nombramiento del archivo es la misma que para el nombramiento del elemento del cual se están graficando los datos, es decir, se nombra del mismo modo que el elemento, y se le añade al final la velocidad a la cual se ha realizado esa simulación.

### 3.2.2 Densidad espectral de potencia

Antes de hablar de la densidad espectral de potencia, es importante realizar una introducción que de una idea básica del campo en el que podemos encuadrar esta técnica de análisis de datos. Dicho campo se denomina como análisis espectral, y es un método empleado para analizar y expresar de manera gráfica las pautas dinámicas de la señal en el dominio de la frecuencia.

La principal herramienta utilizada en este tipo de estudios es la DFT, es decir Discret Fourier Transform o Transformada Discreta de Fourier. Después de ello, existen distintas técnicas dependiendo del tipo de señal que queramos procesar:

- Las series de Fourier se emplean para representar datos periódicos.
- La transformada de Fourier, por otra parte, tiene su utilidad con fenómenos transitorios.
- Por último, el caso interesante para el desarrollo de este trabajo fin de grado, es el de la densidad espectral de potencia, cuya función es la representación de señales aleatorias de potencia.

En la siguiente fórmula se encuentra la expresión analítica de la DFT, que tiene validez para secuencias discretas  $\{x(n)\}$ ,  $n=0, N-1$  y  $\{X(k)\}$ ,  $k=0, N-1$ :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} ik)$$

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} ik)$$

Una vez descritos los distintos casos en los que deben ser empleadas cada una de las técnicas de análisis y la expresión analítica de la herramienta utilizada, conviene introducir todos aquellos factores que limitan la precisión de este método de observación. Los mecanismos de error que condicionan la exactitud del estudio son los siguientes:

*-Error de “Leakage”:* Consiste en la fuga de potencia espectral en zonas no alcanzadas por la señal física. Este error se puede reducir mediante la aplicación de una ventana temporal adecuada.

*-Errores sistemáticos:* Dichos errores suelen minorar los picos del espectro. Estos errores se solucionan tomando datos de una señal suficientemente larga, lo cual permite tener una resolución apropiada.

*-Errores aleatorios.* Este tipo de errores se pueden controlar promediando regiones adyacentes del espectro.

Ahora que están situados los aspectos introductorios principales, se procede a una explicación más específica del análisis de señales aleatorias. Para ello, se utiliza la función de distribución de la densidad de potencia o PSD. [19] La definición básica de esta herramienta es una distribución general  $S$  cualquiera, cuya suma en el caso de elementos discretos, sobre el rango de frecuencia da la potencia  $P$  de la señal. La PSD se puede calcular a través de la FFT, o Transformada Rápida de Fourier, cuya expresión analítica es la siguiente:

$$FFT = \frac{1}{N\Delta t} \sum x^2 \Delta t$$

Donde “ $x$ ” es la señal de entrada. La PSD debe igualarse a la potencia total, y de este modo, sustituyendo en la ley de Parseval, se obtiene la siguiente expresión [19]:

$$S(k) = \frac{\Delta t}{N} |X(k)|^2$$

Las unidades de “ $S$ ” son “ $x^2/\text{Hz}$ ”, en este caso “ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ”.

## Capítulo 4

# Metodología

El objetivo de este capítulo es exponer la metodología que se seguirá para la obtención de los objetivos planteados al inicio de este trabajo fin de grado. Es necesario la dedicación de un capítulo completo a un contenido al cual se hará referencia a lo largo del documento e incluso se repetirán ciertas partes del mismo debido a la importancia que tiene la aplicación de un método estricto en cualquier tipo de proyecto de ingeniería. Por lo tanto, a lo largo de los siguientes párrafos se sintetizará todos y cada uno de los pasos que componen el desarrollo del proyecto.

En primer lugar, se parte de un objetivo, el cual es observar de manera analítica los resultados que se obtienen en el campo de las vibraciones en determinados puntos de un ferrocarril. Para ello, se decide llevar a cabo dichos experimentos mediante un software de simulación. De este modo, el primer paso, es realizar un análisis de todos aquellos programas que permitan la extracción de los datos necesarios. Tras realizar una amplia búsqueda de información y contrastarla con expertos del sector, se concluye que el

software idóneo para ejecutar este proyecto es Universal Mechanism, un software de origen ruso cuyas ventajas competitivas se exponen a continuación:

-La focalización del programa en el ámbito que ocupa este proyecto, lo hace ideal, ya que cuenta con un entorno especializado en la resolución de problemas similares, y permite de manera sencilla la modificación de parámetros característicos ferroviarios.

-La existencia de una gran cantidad de librerías que posibilitan la utilización de múltiples elementos relativos al sector del ferrocarril, y que convierten al programa en una aplicación muy versátil.

-La extensión del período de prueba es otra de las ventajas a tener en cuenta, pudiendo realizar modificaciones a lo largo de toda la realización de este proyecto sin limitaciones de software.

En segundo lugar, una vez seleccionado el software de aplicación, se deben elegir las variables sobre las cuales se realizará el estudio y en qué puntos del ferrocarril, y a su vez el método de análisis y procesado de las mismas. Para este trabajo se extraerán los datos relativos a las aceleraciones verticales en el centro de masas de cada eje y en las cajas de grasa del modelo elegido. Dichos datos se exportarán al software ofimático “Microsoft Office Excel 2013” y serán manipulados mediante Matlab, debido a la facilidad que ofrece dicho entorno para la manipulación y programación de algoritmos con grandes volúmenes de datos, como es el caso. Una vez elegidas las aplicaciones que servirán como herramientas para el procesado de los datos, se debe escoger el método de análisis de los mismos. En esta ocasión se utilizará el método de la Densidad Espectral de Potencia, la cual permite la búsqueda sencilla de patrones en los armónicos que componen la señal de respuesta. Además, dicha herramienta es idónea para el estudio de señales aleatorias de potencia, que no siguen un patrón definido.

Tras haber definido de manera exhaustiva los objetivos perseguidos en este proyecto, pasando por la elección del software usado como herramienta y hasta la técnica usada para el procesado de los datos obtenidos, es necesario realizar una explicación de cómo se llevarán a cabo estos pasos, incluyendo la especificación de todos los pasos intermedios de aprendizaje, la selección de los modelos sobre los cuales se realizarán los experimentos, y por supuesto, la elaboración del trayecto sobre el cual se simulará el vehículo ferroviario en funcionamiento.

El primer paso, ya que se ha seleccionado como software Universal Mechanism, es realizar una fase de aprendizaje de uso del entorno de dicha aplicación. Para ello, se empleará todo el material que ofrece la página web del distribuidor en forma de manuales. Dichos manuales permiten alcanzar un conocimiento profundo de todas las posibilidades que brinda el programa y constituyen una bibliografía muy extensa de consulta para solventar problemas puntuales que surgen a lo largo de la realización del proyecto. De este modo, en primer lugar, se realizan los siguientes tutoriales:

-“*GS UM*”: Se trata del primero de los manuales bautizados como “Getting started” (Empezando), y que conforma una primera toma de contacto con el programa, además de una fuente de información acerca de los módulos de los que dispone y las funcionalidades que ofrece.

-“*GS UM Loco*”: Es el segundo de los tutoriales básicos que se realizarán, ya que brinda una introducción muy completa al módulo que se utilizará para la ejecución de este proyecto, el llamado UM Loco.

-“*08 UM Loco*”: Finalmente, se revisarán ciertas partes importantes del manual avanzado del módulo utilizado, como puede ser todo aquello relativo a la realización de simulaciones en distintas situaciones o la configuración del software que resuelve las ecuaciones del movimiento. También se utilizará este tutorial con vistas a la adición de nuevos elementos a modelos ferroviarios previamente constituidos.

De esta forma, y por medio del uso de estos manuales, se conseguirá obtener un dominio teórico del programa. Posteriormente, para completar la formación relativa al programa, y de cara a realizar un primer experimento que permita la obtención de ciertos resultados previos, se ejecutará un primer conjunto de simulaciones que permitan consolidar los conocimientos obtenidos. Para ello, se seleccionará un primer modelo sencillo, que cuente por defecto con todos los elementos necesarios para la correcta realización del estudio.

El modelo elegido para el primer conjunto de simulaciones es el modelo “AC4”, incluido en la base de datos de Universal Mechanism, y que cuenta con variables por defecto correspondientes al centro de masas de los ejes y a sus respectivas cajas de grasa. Por lo tanto, en resumen, el primer modelo de estudio consta de dos ejes montados con sus respectivas ruedas, en las cuales se encuentran modeladas sus correspondientes cajas

de grasa. Se realizará un conjunto de simulaciones en un rango de velocidades de 30 a 50 metros por segundo en rangos de 2,5 m/s. y se registrarán únicamente los datos correspondientes al primero de los WSet del modelo.

Ya que se ha elegido el primer modelo de estudio, y el rango de velocidades a las cuales se ensayará, debe elegirse la configuración del trayecto, el cual, para el conjunto de este proyecto, será el mismo en ambos experimentos. Concretamente, se simulará un trayecto de 650m. Caracterizado por la existencia de un tramo con irregularidades entre los 500 y 600m. Las irregularidades serán periódicas y seguirán la expresión analítica que se expone a continuación, donde “x” es la variable longitudinal de la vía en metros:

$$Irreg = \left| \sin \frac{\pi x}{12.5} \right| (mm)$$

Finalmente, se obtendrán los datos previamente seleccionados y se realizará el análisis de la densidad espectral de potencia. Para ello, se realizará, fundamentalmente una extracción de los datos correspondientes a los tres primeros armónicos del espectro. En este caso, al tratarse de un experimento más sencillo, se dedicará un poco más de tiempo al análisis de las gráficas, y se analizarán más armónicos del espectro.

El último paso, tras la realización de manera correcta del primer conjunto de simulaciones y la consolidación de los conocimientos obtenidos sobre el programa, y la iniciación al análisis frecuencial ejecutada, se realiza un segundo experimento, mucho más completo, con un modelo cuyas características permiten que se asemeje de una manera mucho más fiable a un modelo real.

Este segundo modelo de estudio, consiste en un conjunto de 20 vagones guiados por una locomotora. De estos veinte vagones, se tomará el primero de ellos como fuente de datos. Dentro de este primer vagón, existen dos bogies, con dos ejes cada uno. En este caso, el vehículo no incluye cajas de grasa en su configuración por defecto, pero es posible añadirlas a través del módulo UM Input de Universal Mechanism. Resumiendo, se dispone de un modelo con 4 ejes montados con sus respectivas cajas de grasa en cada rueda, por lo que se obtendrán datos de 12 puntos de estudio distintos, 4 centros de masas, uno por cada uno de los ejes, y 8 cajas de grasa, una por cada rueda.

Para este segundo caso, se realizará un conjunto de simulaciones en un rango de 4m/s. a 56m/s. en intervalos de 4m/s. Se decide llevar a cabo simulaciones hasta esa



---

velocidad límite debido a que en estudios anteriores se constata que a 60 m/s los resultados obtenidos comienzan a no ser fiables. En este caso, las características del trayecto sobre el cual circulará el vehículo son las mismas que para el experimento inicial.

Finalmente, una vez obtenidos todos los datos necesarios, y habiendo sido estos procesados mediante Matlab, se dispone de 14 gráficas para cada uno de los puntos seleccionados. De dichos espectros se extraerán los datos correspondientes a los tres primeros armónicos, y se cruzarán entre ellos, tratando de obtener patrones de crecimiento y decrecimiento, o dependencias lineales.

Tras haber expuesto todos los detalles de la metodología seguida en el desarrollo de este proyecto, se procede en los siguientes capítulos a la exposición de las simulaciones propiamente dichas.

## Capítulo 5

# Experimento con modelo básico

Este primer experimento consistirá en una primera toma de contacto con el modo de funcionamiento del programa de simulación ferroviaria Universal Mechanism. En concreto es interesante el cálculo de vibraciones verticales en el eje montado que realiza el simulador.

Para ello se toma como modelo de estudio el vehículo “AC4”, que será descrito más adelante, y se simula el trayecto que realizaría dicho vehículo durante una cierta distancia, en la que contamos con un tramo sin irregularidades en la vía, cuyo fin es estabilizar las vibraciones en el eje de las ruedas, y una vez circulando a velocidad de régimen, aparecen irregularidades periódicas verticales en el carril derecho. Todo el trayecto se simula en un rango de velocidades que abarcan desde 30 m/s a 50 m/s, y los datos tomados se corresponden con el primer eje del vehículo, con sus respectivas cajas de grasas

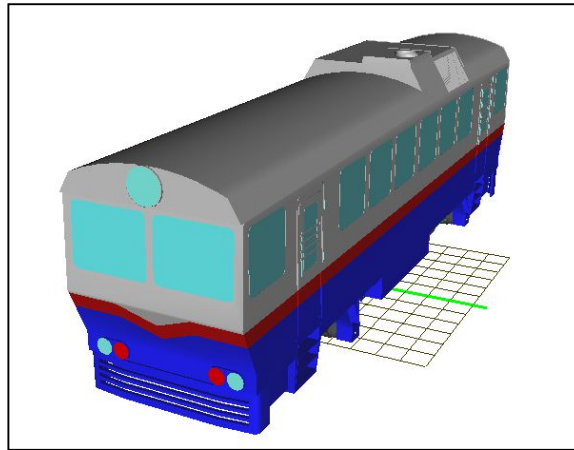
Una vez obtenidos todos los datos de aceleraciones, se tratan dichos datos para obtener el PSD (Power Spectral Density) en frecuencias, y se buscan pautas y picos de frecuencia que tengan una relación de proporcionalidad con la velocidad a la que se ha realizado el trayecto.

## 5.1 Modelo utilizado

Para esta primera toma de contacto con el programa Universal Mechanism se emplea un vehículo que proporciona la propia página web del simulador, llamado “AC4” y que se puede encontrar en el siguiente enlace:

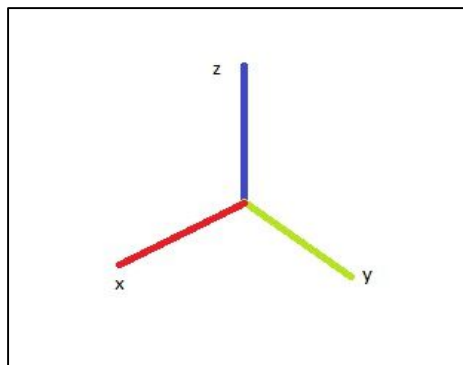
[www.universalmechanism.com/download/80/ac4.zip](http://www.universalmechanism.com/download/80/ac4.zip)

El vehículo es bastante básico, y cuenta con un único coche autoportante, que se desplaza mediante dos ejes con ruedas caladas, que llevan a cabo la tracción del vehículo. La apariencia del modelo es la siguiente:



**Figura 5.1 Vista isométrica del modelo “AC4”**

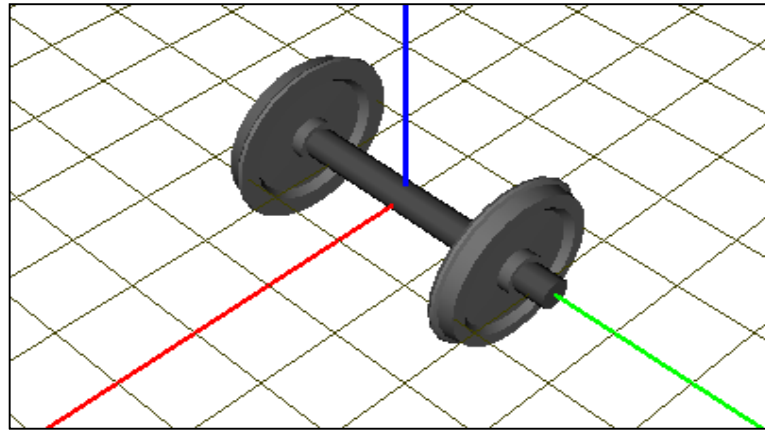
El sistema de referencia que siguen todos los elementos del ferrocarril se muestra a continuación:



**Figura 5.2 Sistema de referencia Universal Mechanism**

A continuación se describen los distintos subsistemas y cuerpos que componen el vehículo y sus características más importantes:

-*WheelSet*: Se trata del eje, que cuenta con dos ruedas caladas. El tren cuenta con dos WSet. Es uno de los elementos más importantes para realizar la simulación, ya que en su centro de masas se tomarán los datos de las vibraciones. A continuación se adjuntan una imagen de la visualización del mismo, y una tabla con las especificaciones técnicas más importantes:



**Figura 5.3 Visualización del WheelSet**

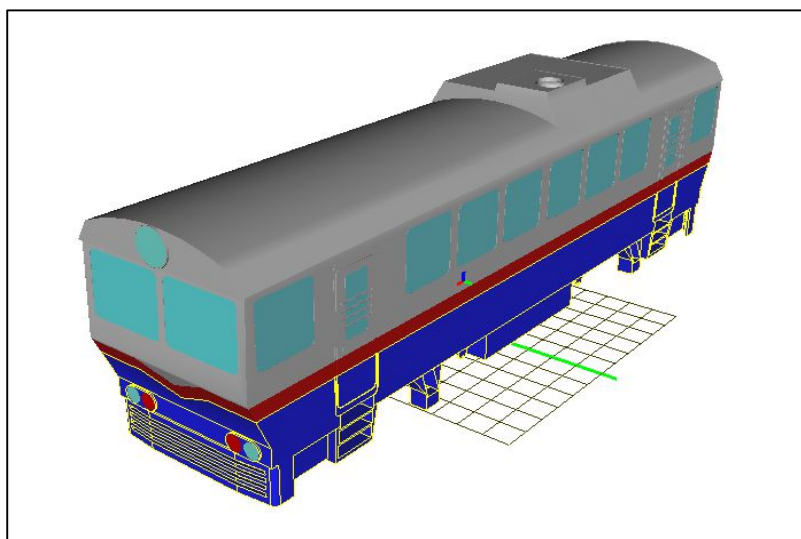
Radio de la rueda:	0,525 m.
Longitud del eje:	2,2 m.
Semibase:	0,79 m.
Masa del WSet:	3650 Kg.
Diámetro del eje:	0,1 m.
Posición del WSet1: (Respecto del centro del vehículo)	3,21 m.
Posición del WSet2: (Respecto del centro de masas del vehículo)	3,79 m.

**Tabla 5.1 Especificaciones del WSet del modelo “AC4”**

El perfil de todas las ruedas del WSet corresponde con el perfil llamado “newlocow.wpf” proporcionado por el simulador.

-*CarBody*: Se trata de la forma de la caja del vehículo. En este caso es únicamente un elemento gráfico, lo que quiere decir que su función es meramente decorativa, por lo

que la alteración de su forma no repercutiría en la simulación a realizar. Sin embargo, sí que es posible añadirle ciertas características, como las que se adjuntan a continuación:



**Figura 5.4 Visualización de la caja del modelo “AC4”**

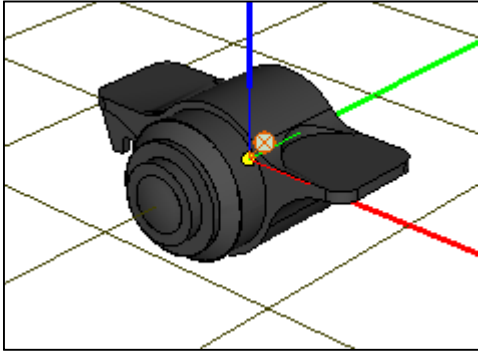
Masa de la caja:	38300 Kg.
Posición del centro de masas:	[0, 0, 1,525] (en el eje vertical)

**Tabla 5.2 Especificaciones de la caja del modelo “AC4”**

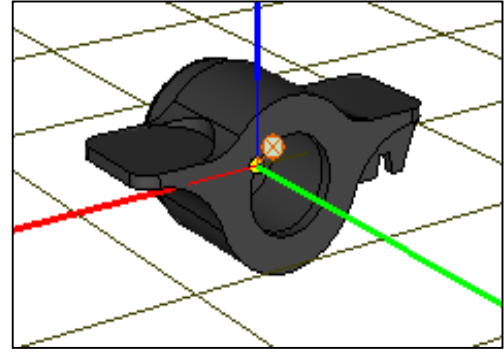
-*AxleBox*: Se trata de la caja de grasas del ferrocarril, cuya función es hacer de nexo entre la masa suspendida y no suspendida, y lubricar los elementos rodantes del ferrocarril. Consta de un rodamiento que se encuentra en los bordes del WSet, por lo que este modelo cuenta con 4 AxleBox, dos por cada eje. En ellas se registrarán también datos de aceleraciones. En este modelo de caja de grasas su peso es despreciable. Sus especificaciones técnicas son las siguientes:

Momento de inercia en el eje y:	3 kg·m <sup>4</sup>
---------------------------------	---------------------

**Tabla 5.3 Especificaciones de las cajas de grasas del modelo “AC4”**



**Figura 5.5 Visualización externa de la caja de grasas**



**Figura 5.6 Visualización interna de la caja de grasas**

## 5.2 Trayecto simulado

El trayecto utilizado para llevar a cabo las simulaciones a las distintas velocidades consta de las siguientes características:

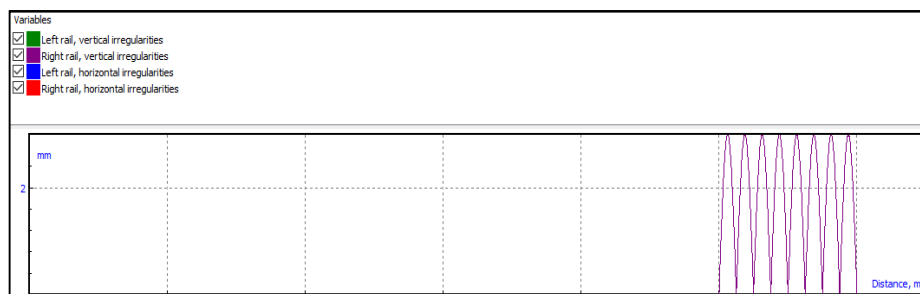
-Todo el tramo se realiza en recta.

-Una longitud total de 650 metros, dividida en 3 tramos bien diferenciados. El primer tramo llega desde el inicio del trayecto hasta los 500 metros, y su fin es permitir la estabilización de las vibraciones naturales del ferrocarril. El segundo cuenta con una irregularidad vertical periódica en el carril derecho que sigue la función  $f(x)$  descrita más abajo. El tercer tramo vuelve a estar libre de irregularidades, para finalizar la simulación.

$$f(x) = \text{abs} \left| \sin \left( \frac{\pi x}{12.5} \right) \right|$$

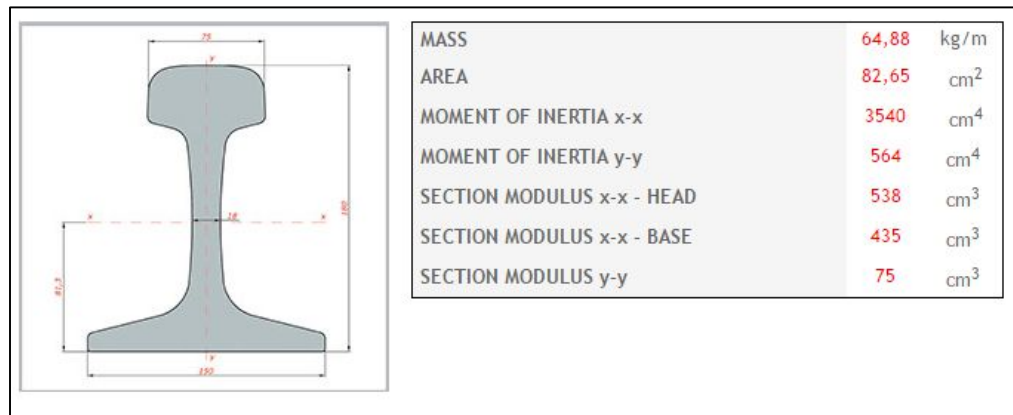
*donde x es la distancia recorrida, en metros.*

De este modo, la apariencia longitudinal de la vía es la siguiente:



**Figura 5.7 Perfil de las irregularidades en la vía**

-El perfil de vía utilizado es el “R65”, que se incluye en la base de datos del programa, y que consta de las especificaciones técnicas que se adjuntan en la imagen:

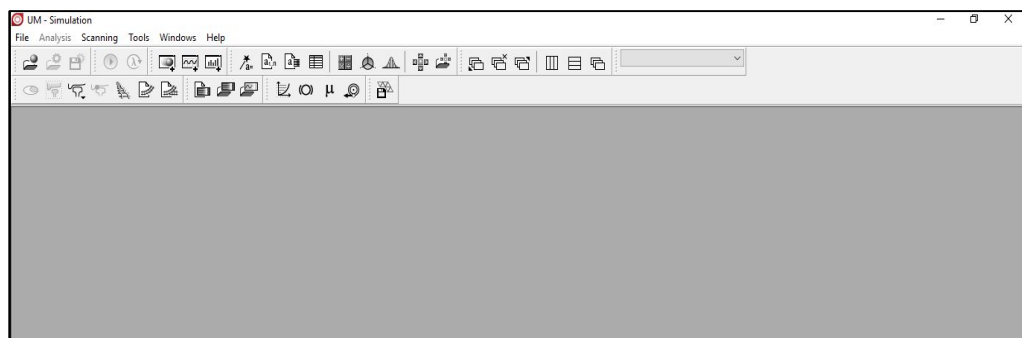


**Figura 5.8 Especificaciones técnicas del carril utilizado [20]**

### 5.3 Configuración de Universal Mechanism

Como se menciona en anteriores capítulos, la herramienta informática utilizada es Universal Mechanism en su versión 8.0.5.1. Dado que el modelo utilizado ya incorpora cajas de grasa, no es necesario acometer ninguna modificación en su diseño, por lo que sencillamente sería necesario usar el módulo “UM-Simulation”. En los siguientes párrafos se exponen todos los pasos necesarios para configurar correctamente la aplicación.

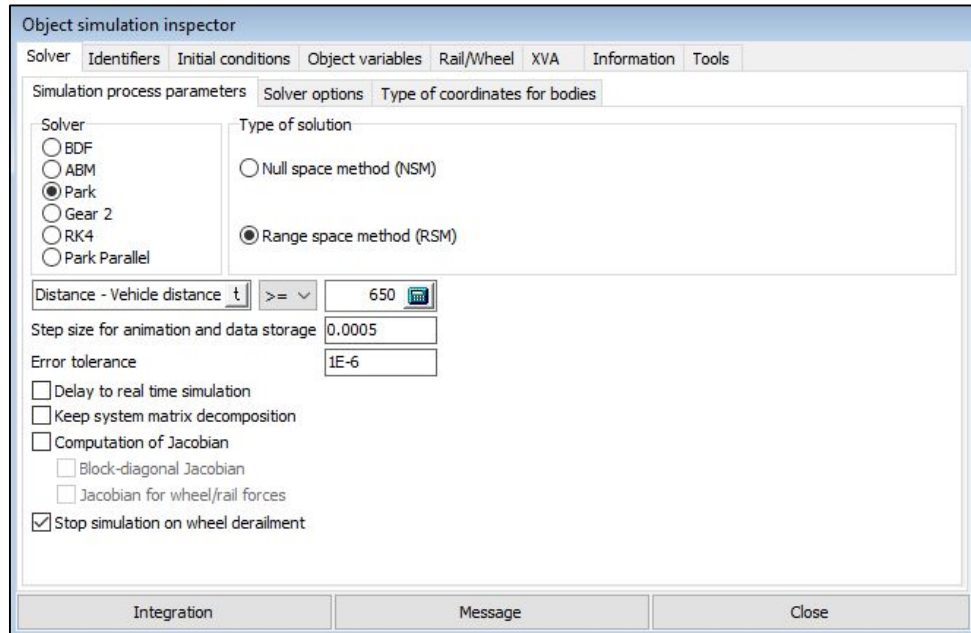
Una vez abierto el programa, aparece la siguiente ventana:



**Figura 5.9 Ventana inicial UM-Simulation**

El siguiente paso es pinchar en la pestaña “File” → “Open” y seleccionar el directorio en el que se encuentra el modelo a utilizar y que ha sido descargado

previamente. Una vez abierto, el programa permite acceder a la pestaña “Analysis” → “Simulation”. En dicha pestaña debe configurarse todas las opciones del “solver” usado por el simulador. La apariencia de dicha ventana se adjunta en la siguiente imagen:



**Figura 5.10 Ventana “Object simulation inspector”**

En esta ventana también se deben seleccionar los perfiles, tanto de la rueda como de la vía, en la pestaña “Rail/Wheel”. El “solver” utilizado para este tipo de simulaciones es “Park” y el tipo de solución “RSM”. En esta ventana también seleccionamos la longitud del trayecto de la simulación, que en este caso será de 650m. Finalmente, se debe seleccionar el tamaño de paso para calcular datos. El valor de este parámetro se calcula de la siguiente manera, sabiendo que la frecuencia de muestreo seleccionada para el experimento es de 2000Hz.

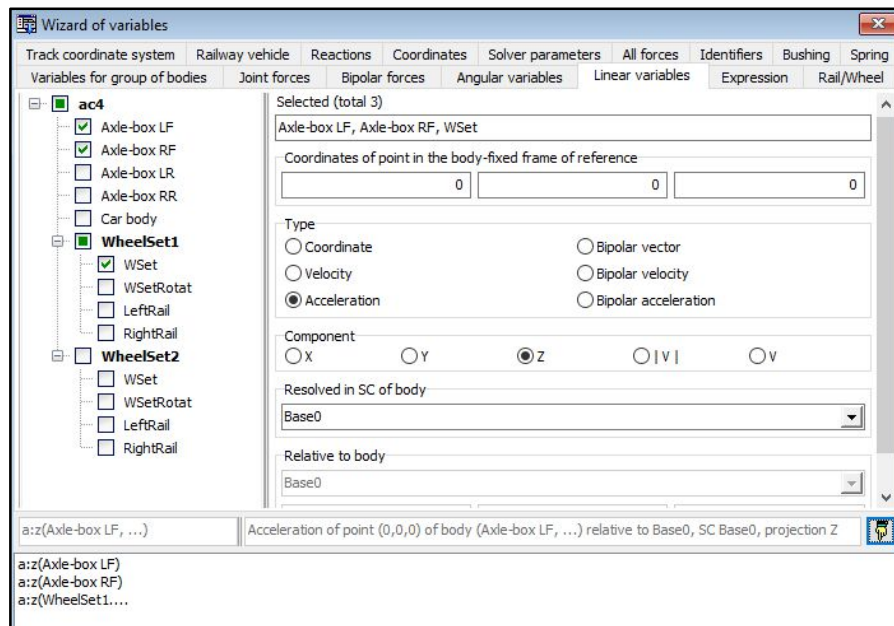
$$f_m = \frac{1}{t} = 2000 \rightarrow t = \frac{1}{2000} = 0,0005s.$$

Una vez se configura esta ventana, se deben seleccionar tanto la velocidad que alcanzará el vehículo, como las variables que serán almacenadas para su posterior estudio. La velocidad se cambia en la propia ventana de la simulación, en la pestaña “Identifier”, cambiando el valor “v0” para cada caso. Para este experimento las velocidades seleccionadas se encuentran en el rango de 30m/s a 50m/s con la excepción de la velocidad de 40, que se cambiará por 39,06m/s.



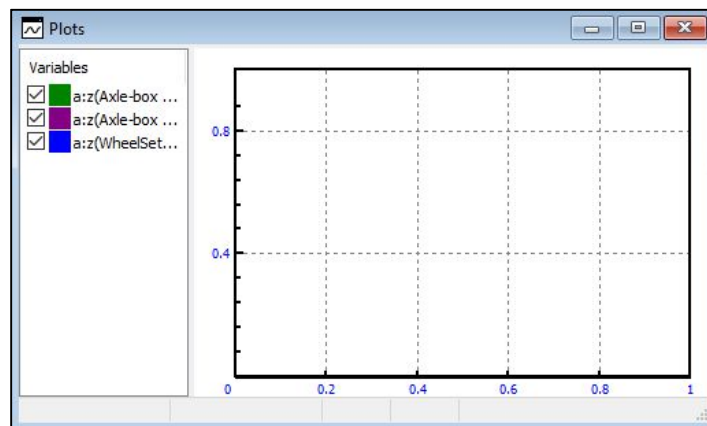
Las variables que se consideran en este caso en concreto son las aceleraciones verticales, en el centro de masas del WSet y en cada una de las cajas de grasas del WSet1. Para obtener los datos numéricos de dichas variables en cada simulación se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se pincha en la pestaña “Tools” → “Wizard of variables”. Una vez abierta la ventana de variables, se accede a las variables lineales, y se seleccionan las opciones que se muestran en la siguiente imagen:



**Figura 5.11 Ventana del gestor de variables**

2. Se pincha de nuevo en la pestaña “Tools”, pero en esta ocasión se abre una “Graphical Window” y se arrastran todas las variables seleccionadas, de modo que la ventana tenga la siguiente apariencia:



**Figura 5.12 Ventana de gráficos**

3. Finalmente, se vuelve a la pestaña de simulación y se pincha en el botón “Integration”. Una vez finalizada la simulación, se seleccionan las variables almacenadas durante el experimento y se exportan a un fichero Excel para su posterior tratamiento.

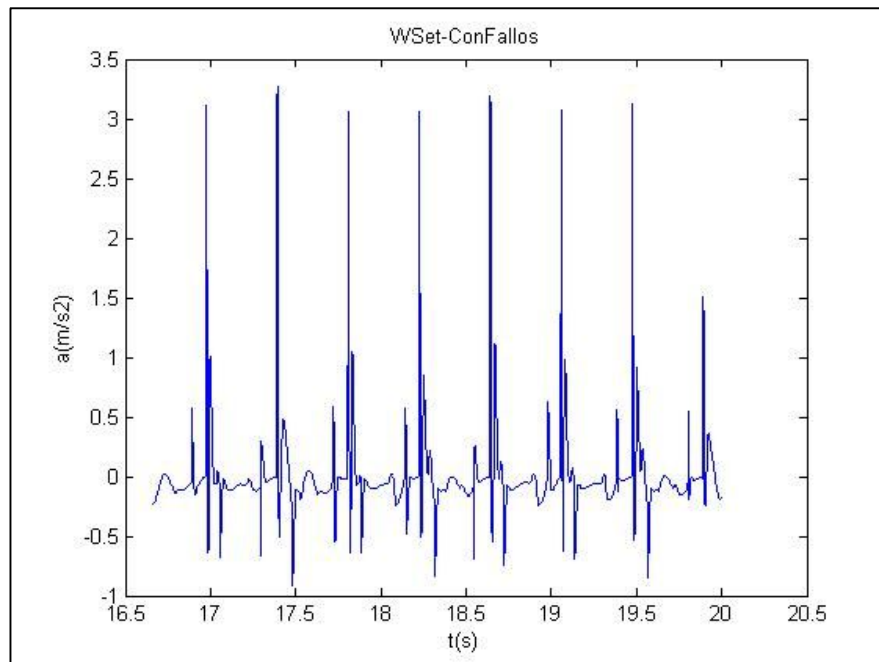
## 5.4 Resultados obtenidos

En el siguiente apartado, se expondrán todos los resultados obtenidos relativos al experimento cuyo objetivo es realizar una toma de contacto con el programa. Al realizarse todas las simulaciones con la misma velocidad de muestreo, aquellos experimentos realizados a menor velocidad contarán con un mayor número de datos. En la siguiente tabla se muestran los datos que se han tomado para cada uno de los experimentos, estando incluida en esa cifra los datos del tramo con irregularidades y del tramo que está libre de las mismas:

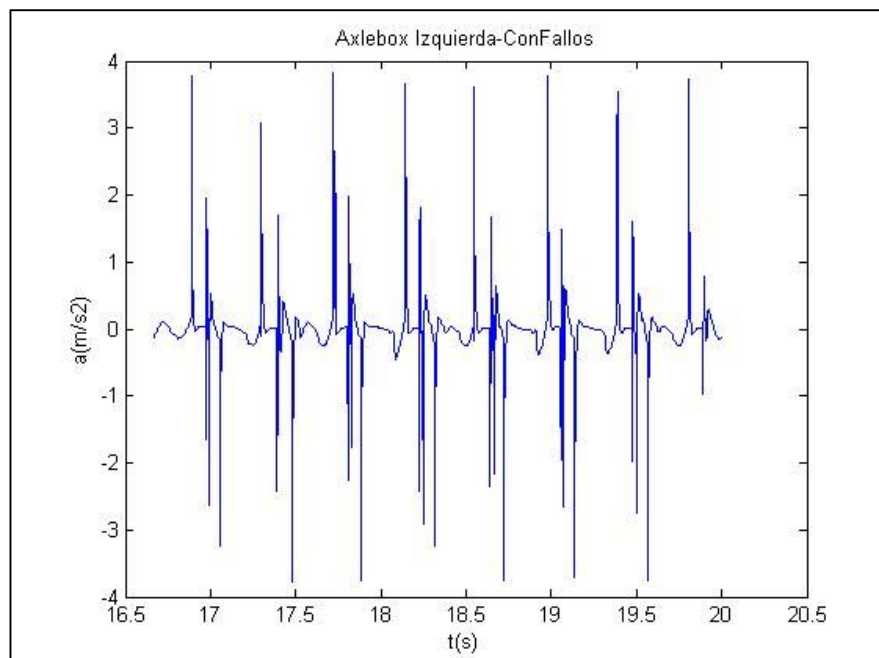
V(m/s)	30	32,5	35	37,5	39,06	42,5	45	47,5	50
Nºdatos	13360	12312	11440	10800	10240	9600	8892	8580	7088

**Tabla 5.4 Número de datos obtenidos en el primer experimento**

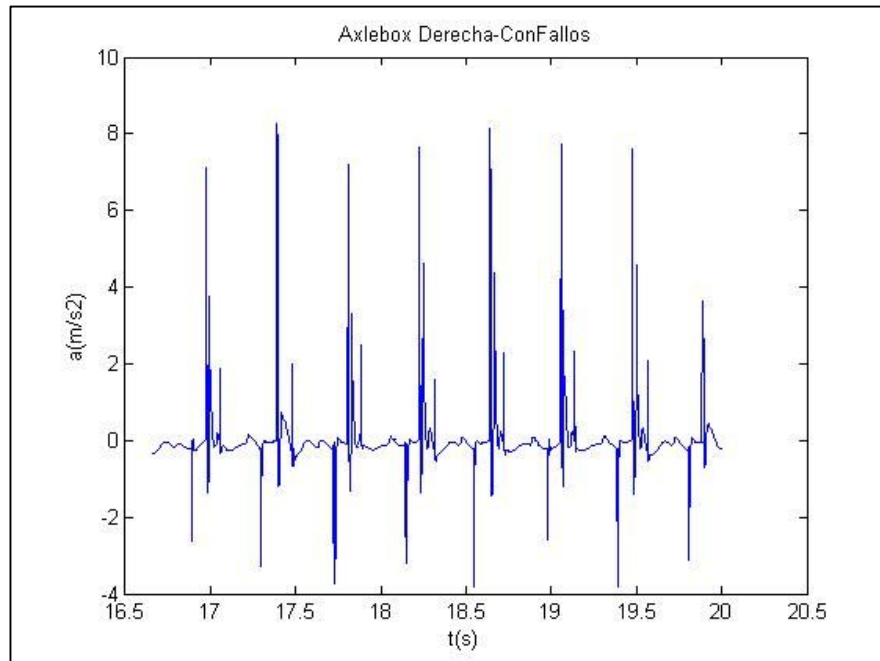
A continuación se muestran los resultados obtenidos en bruto, sin haber sido procesados por Matlab. Únicamente se adjuntan las gráficas correspondientes a la velocidad de 30m/s en el primer eje del vehículo para dar una idea cualitativa de la evolución temporal de las vibraciones a lo largo del trayecto, ya que al variar la velocidad, todas las gráficas son muy similares, solo apreciándose variaciones en la amplitud de las aceleraciones verticales:



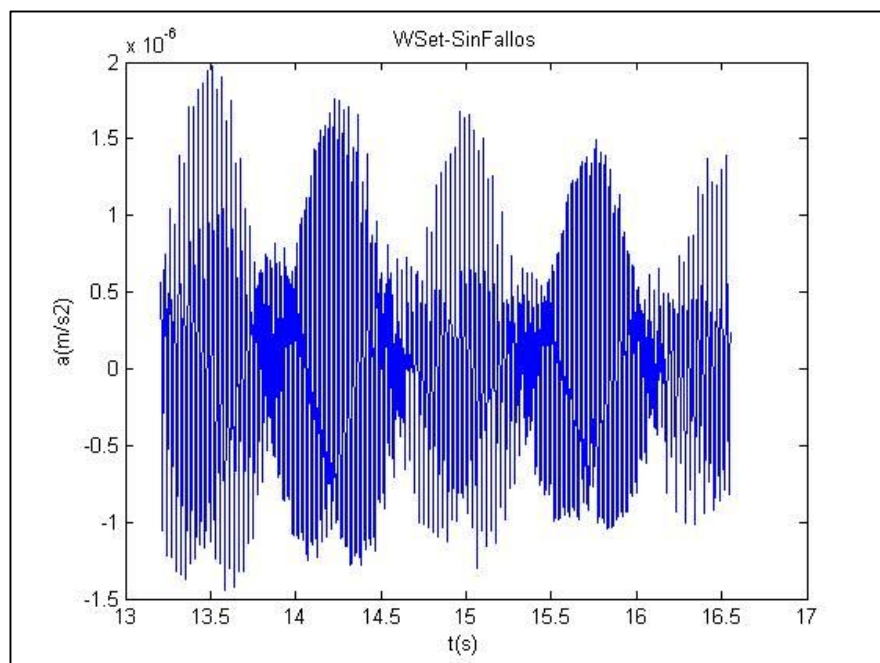
**Figura 5.13 Aceleraciones en el WSet, tramo con fallos**



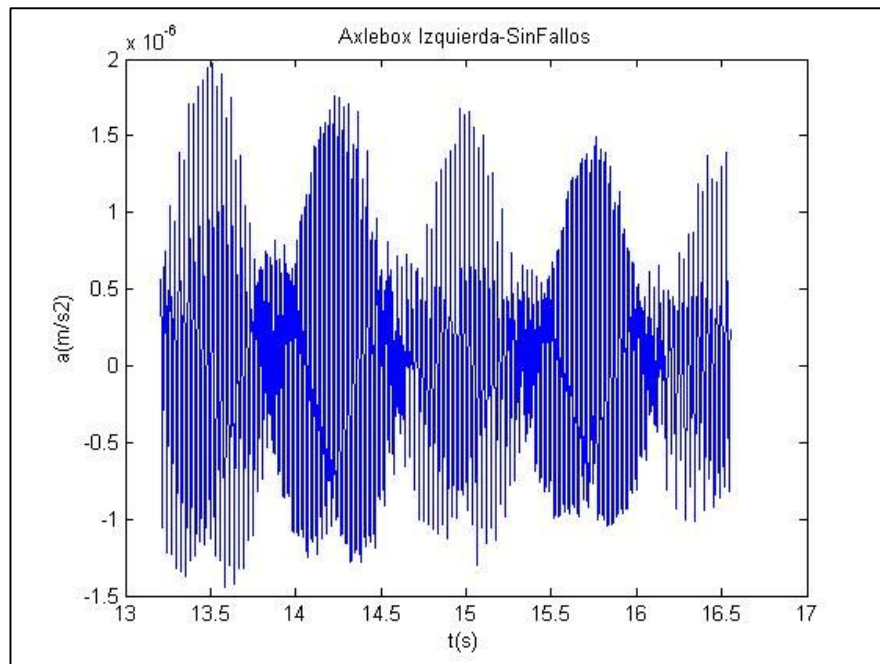
**Figura 5.14 Aceleraciones en la caja de grasas izquierda, tramo con fallos**



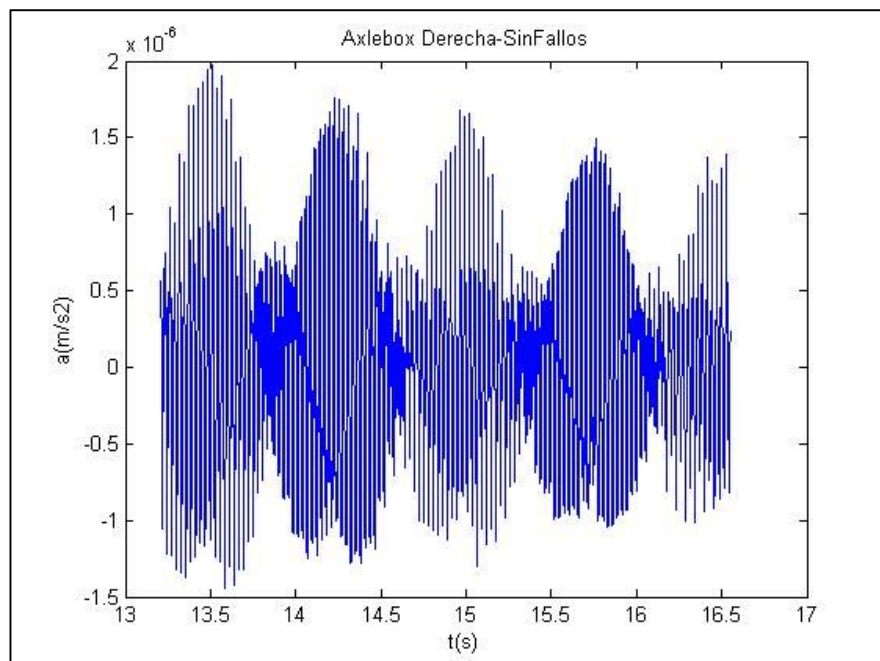
**Figura 5.15** Aceleraciones en la caja de grasas derecha, tramo con fallos



**Figura 5.16** Aceleraciones en el WSet, tramo sin fallos



**Figura 5.17 Aceleraciones en la caja de grasas izquierda, tramo sin fallos**



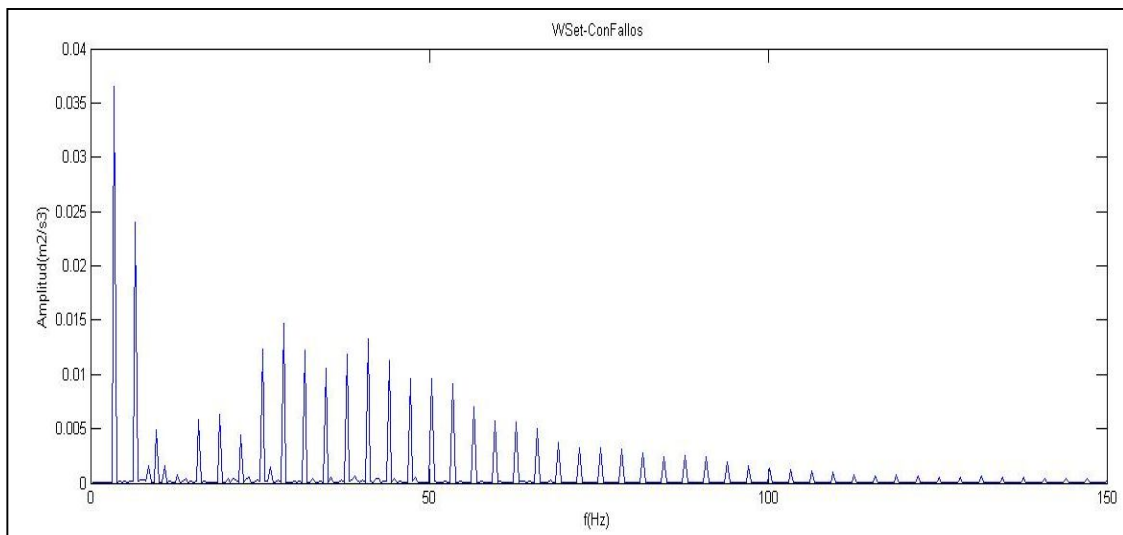
**Figura 5.18 Aceleraciones en la caja de grasas derecha, tramo con fallos**

Se constatan los siguientes hechos:

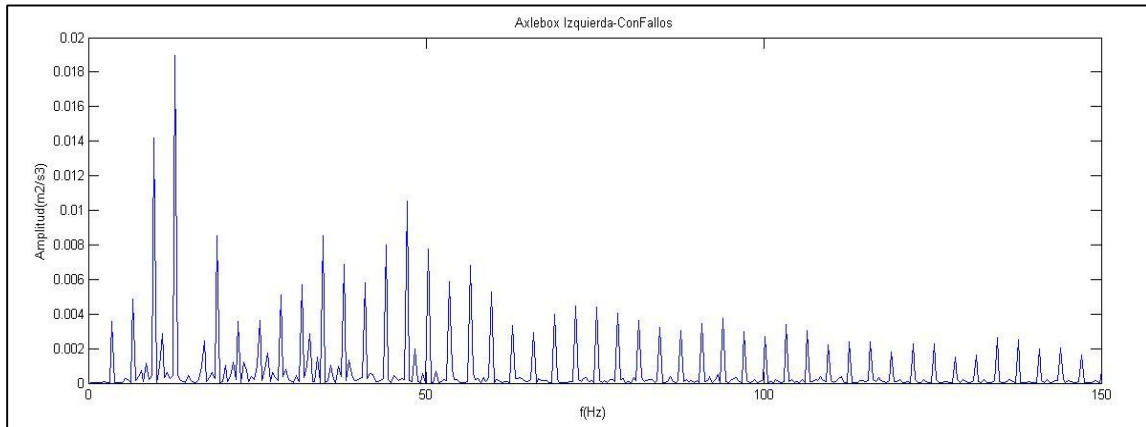
-Se verifica el correcto funcionamiento del vehículo, ya que las vibraciones en el tramo sin irregularidades son insignificantes respecto de la parte con irregularidades, siendo del orden de  $1 \cdot 10^{-6}$ . Del mismo modo, las vibraciones son iguales en todos los puntos que son objeto de estudio.

-Se comprueba que las aceleraciones verticales en el WSet, al estar medidas en el centro de masas del mismo, se corresponden con la media aritmética del valor obtenido en las dos cajas de grasa del eje.

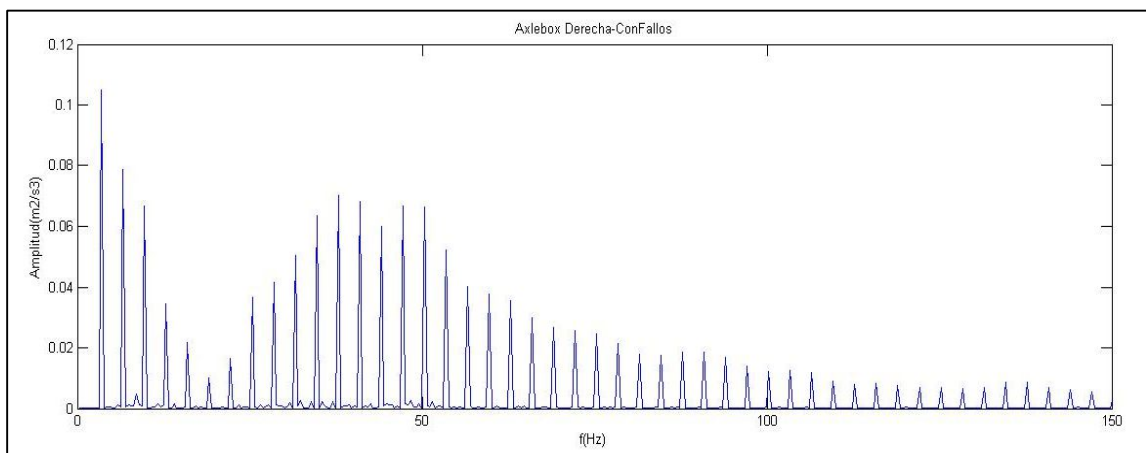
A continuación, se muestra la apariencia de los espectros de frecuencias, los cuales son bastante similares entre ellos cuando se varía la velocidad. De manera representativa se adjuntan todos los espectros de frecuencias relativos al tramo con irregularidades, mientras que del tramo carente de ellas, solo se adjunta una gráfica, ya que las tres gráficas son exactamente iguales. Todas estas densidades espectrales de potencia corresponden a la velocidad de 39,06m/s. Dentro de este espectro, se muestran los resultados comprendidos entre 0Hz y 150Hz, ya que de ahí en adelante podemos considerar que la amplitud de la señal es despreciable. Posteriormente se procederá a realizar un análisis de las gráficas obtenidas y a la obtención de linealidades respecto de la velocidad en distintos puntos de los espectros.



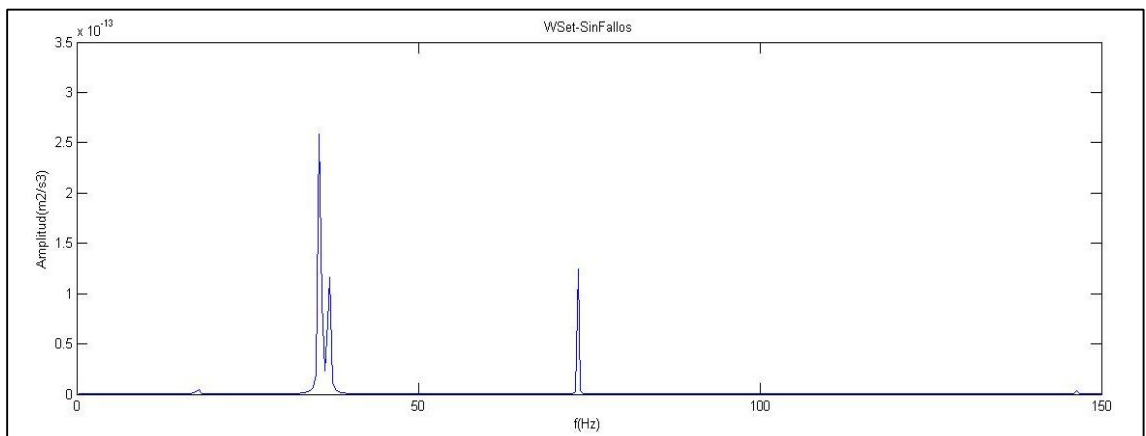
**Figura 5.19 PSD en el WSet a 39,06m/s, con irregularidades**



**Figura 5.20 PSD en la caja de grasas izquierda a 39,06m/s, con irregularidades**

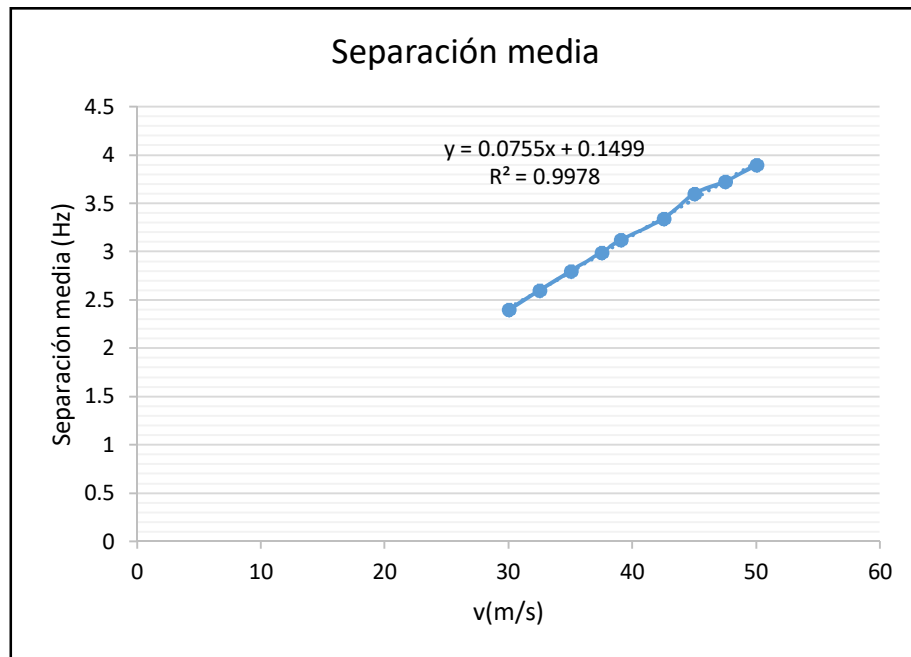


**Figura 5.21 PSD en la caja de grasas derecha a 39,06m/s, con irregularidades**



**Figura 5.22 PSD en el WSet a 39,06m/s, sin irregularidades**

Como comprobación inicial, se constata que la separación media entre picos de frecuencia para los tramos con irregularidades, varía linealmente con la velocidad, correspondiéndose con la frecuencia a la que aparecen dichos picos, obteniendo como resultado esta gráfica, y obteniendo dicha frecuencia con la fórmula detallada bajo la gráfica:



**Figura 5.23 Separación media entre los picos del PSD**

$$f(x) = \text{abs} \left| \sin \left( \frac{\pi x}{12.5} \right) \right| = \sin \left( \frac{\pi \cdot v \cdot t}{12.5} \right) = \sin(\pi \cdot f \cdot t) \rightarrow f = \frac{v}{12.5}$$

Una vez realizada esta comprobación, que confirma que las irregularidades están bien configuradas, se procede al estudio inicial de los tres primeros picos de frecuencia que aparecen en las gráficas de todos los puntos de estudio del tramo con irregularidades. Los resultados obtenidos se expresan a continuación en forma de gráfica:



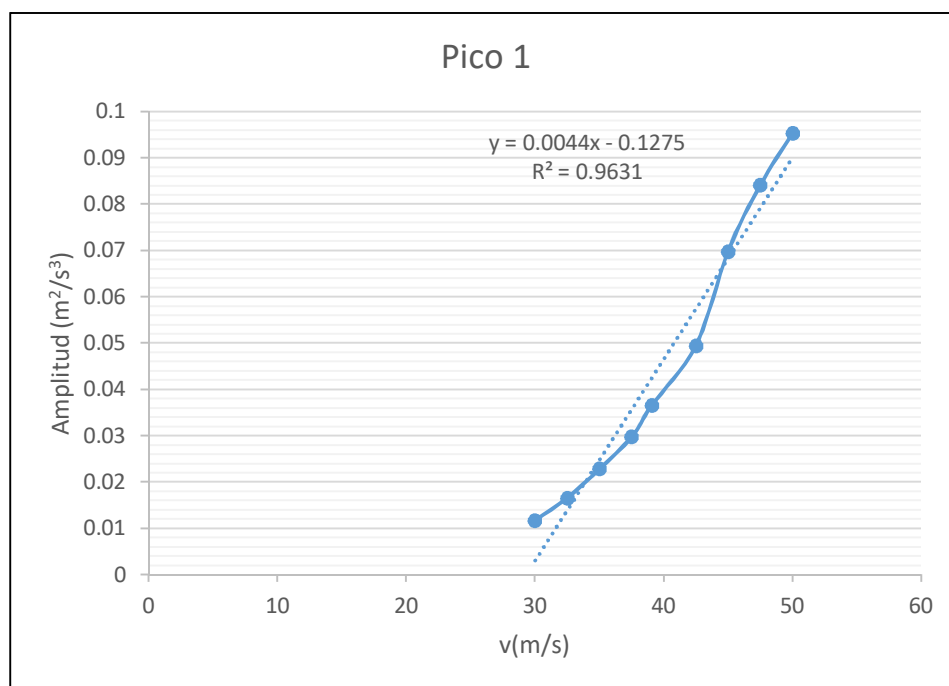


Figura 5.24 Amplitud según la velocidad, WSet, pico 1, experimento inicial

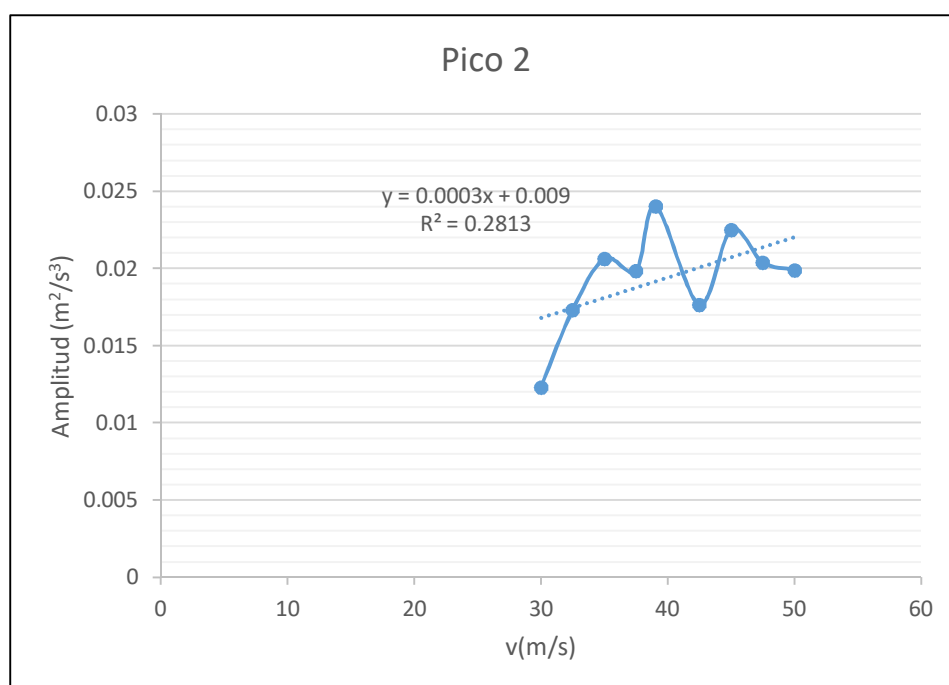
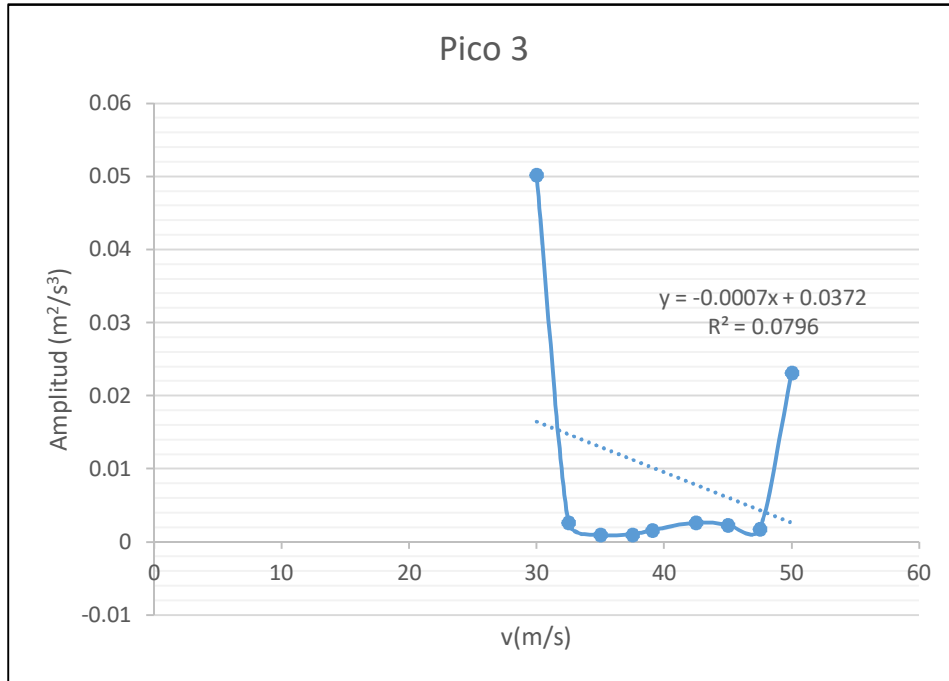
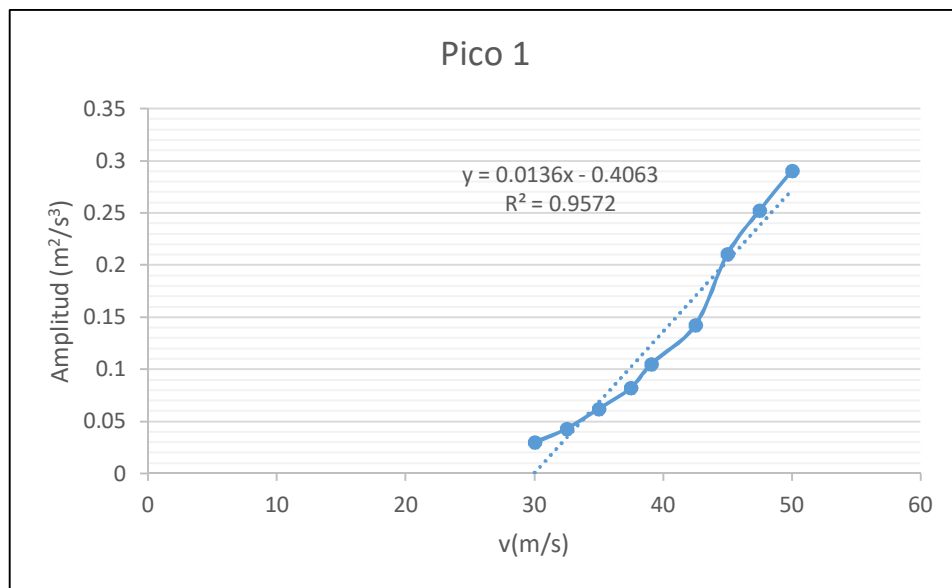


Figura 5.25 Amplitud según la velocidad, WSet, pico 2, experimento inicial

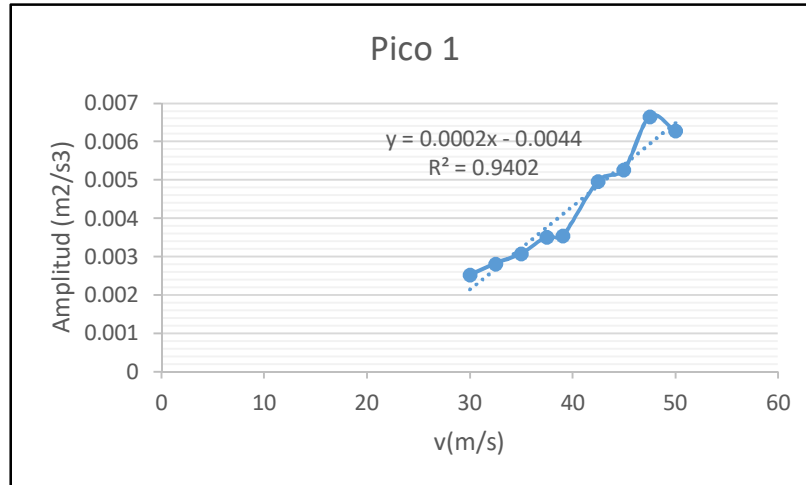


**Figura 5.26 Amplitud según la velocidad, WSet, pico 3, experimento inicial**

En las gráficas expuestas anteriormente, se observa que el único pico cuya amplitud es linealmente dependiente de la velocidad a la que se desplaza el vehículo es el primero. De manera análoga, se realiza este mismo estudio para la PSD de las cajas de grasas, obteniendo el mismo resultado. Por ello, se adjuntan únicamente las gráficas y correlaciones correspondientes al primer pico de frecuencia de ambas cajas:

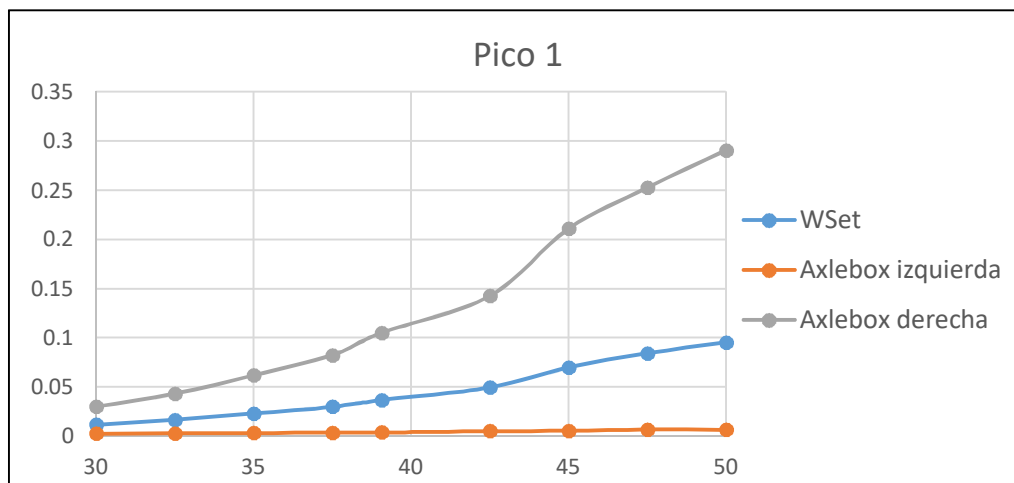


**Figura 5.27 Amplitud según la velocidad, caja derecha, pico 1**



**Figura 5.28 Amplitud según la velocidad, caja izquierda, pico 1**

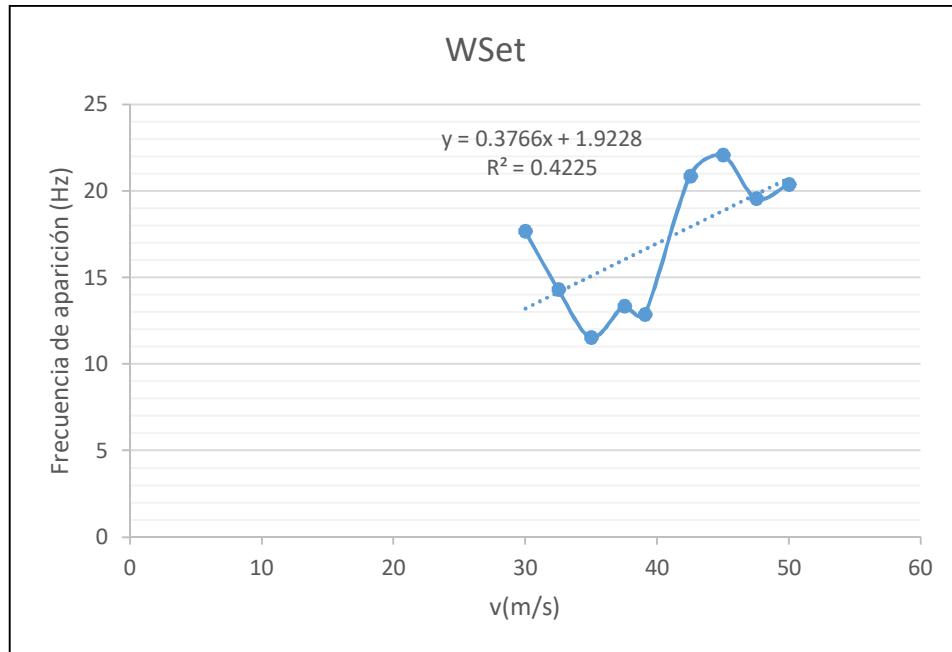
Finalmente se realiza una comparativa entre los primeros armónicos de frecuencia de todos los puntos de estudio, donde se observa, como cabría esperar, que la amplitud de los picos correspondientes a la caja de grasas derecha y al WSet son mayores ya que las irregularidades se encuentran en el carril derecho.



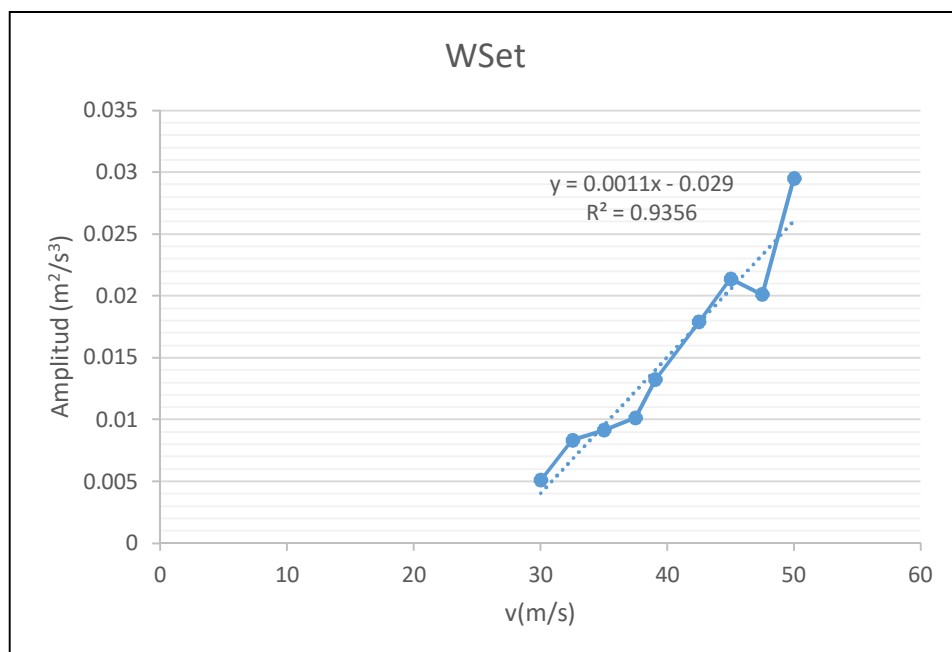
**Figura 5.29 Comparativa del primer pico de la PSD en el primer experimento**

Una vez se ha obtenido este primer resultado, es lógico pensar que podrían existir más puntos de la PSD cuyo valor guarde una relación de dependencia lineal con la velocidad a la que se desplaza el vehículo para todos los lugares de estudio. En este caso, se observarán la frecuencia de aparición del primer valle que existe en todos los espectros, y tanto la amplitud que posee como la frecuencia a la que se encuentra el pico que forma

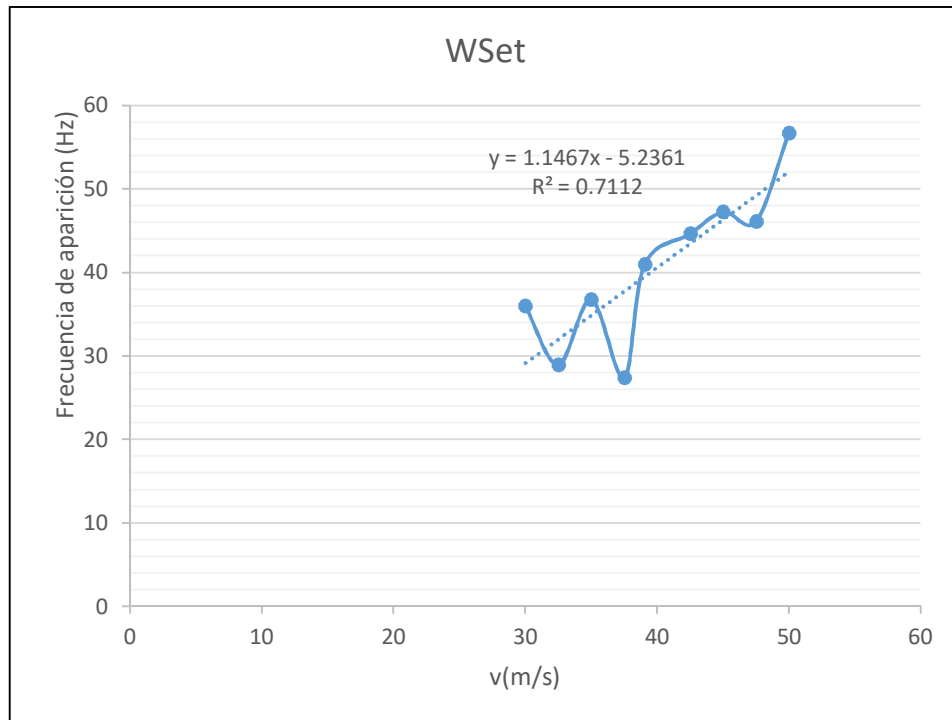
un triángulo aproximadamente en la mitad de todas las gráficas. En el caso de la frecuencia de aparición del valle se adjunta únicamente la gráfica correspondiente al WSet, ya que es muy similar a la de las dos cajas de grasas:



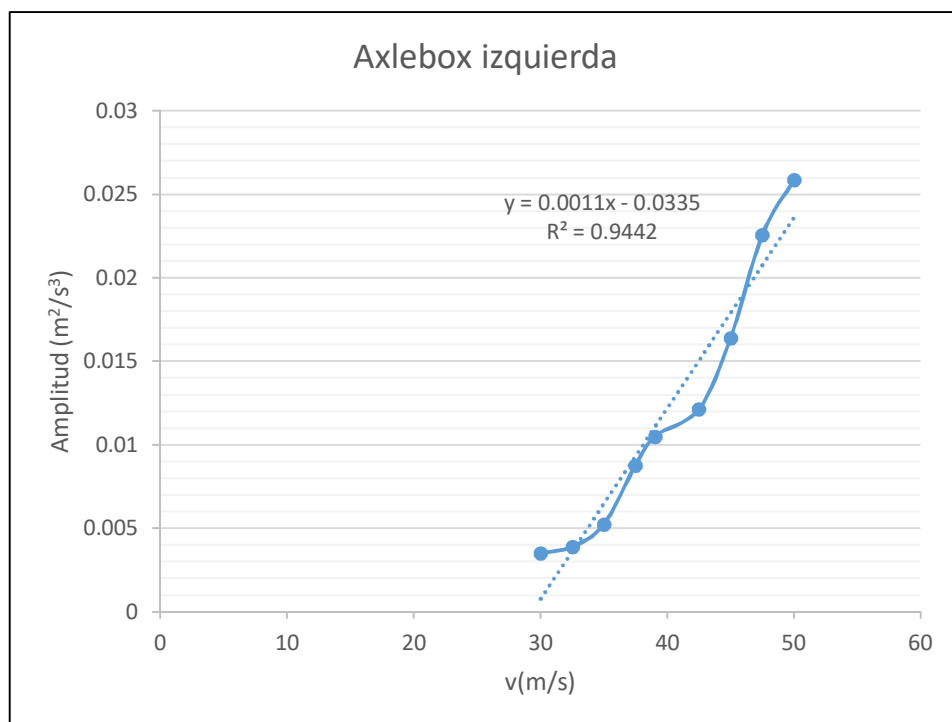
**Figura 5.30 Frecuencias de aparición del primer valle, WSet**



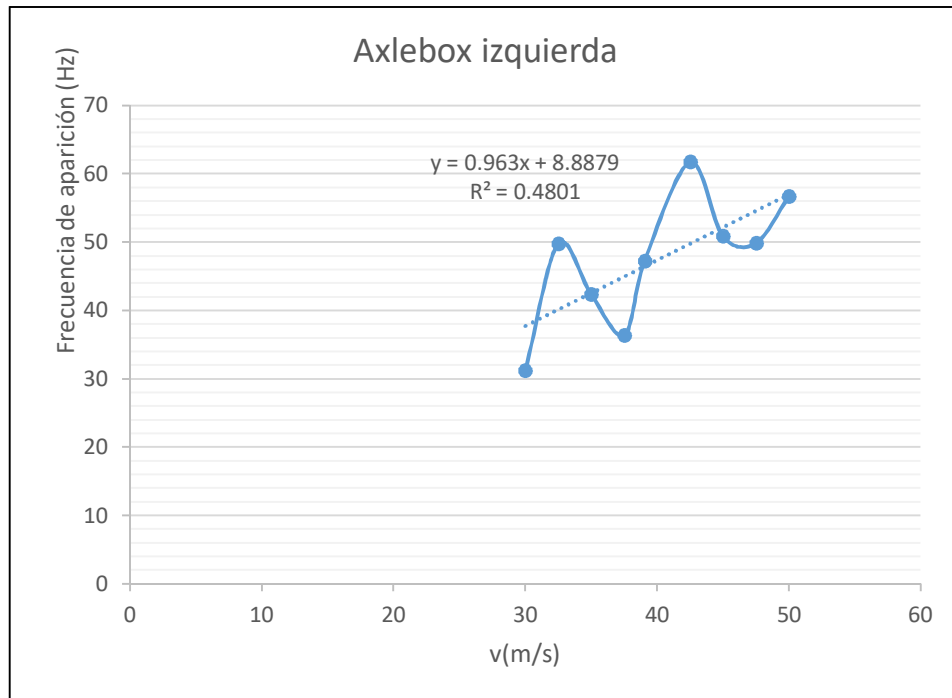
**Figura 5.31 Amplitud del pico triangular, WSet**



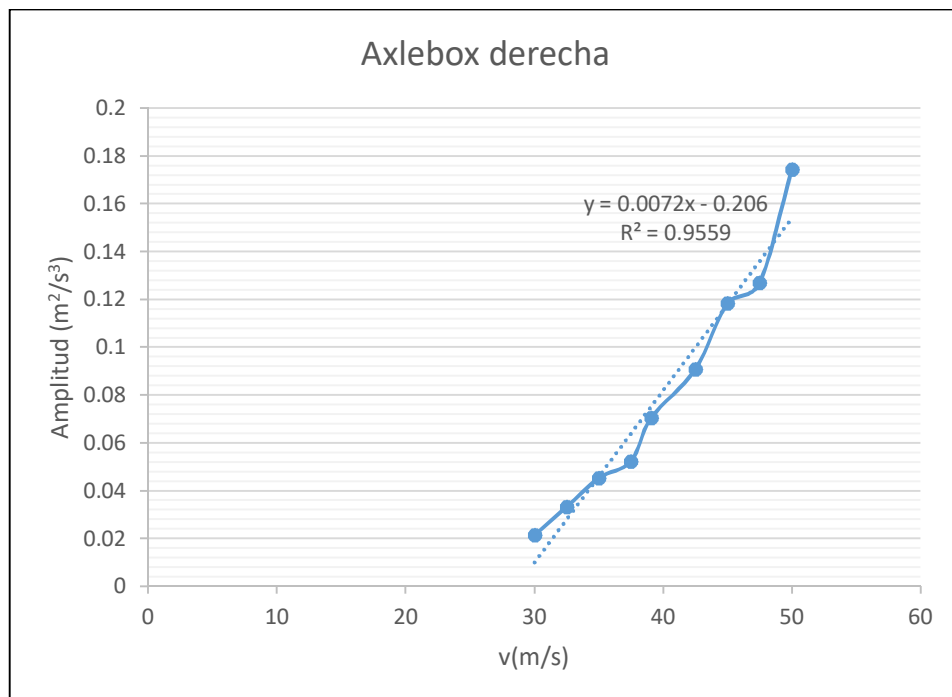
**Figura 5.32 Frecuencia de aparición del pico triangular, WSet**



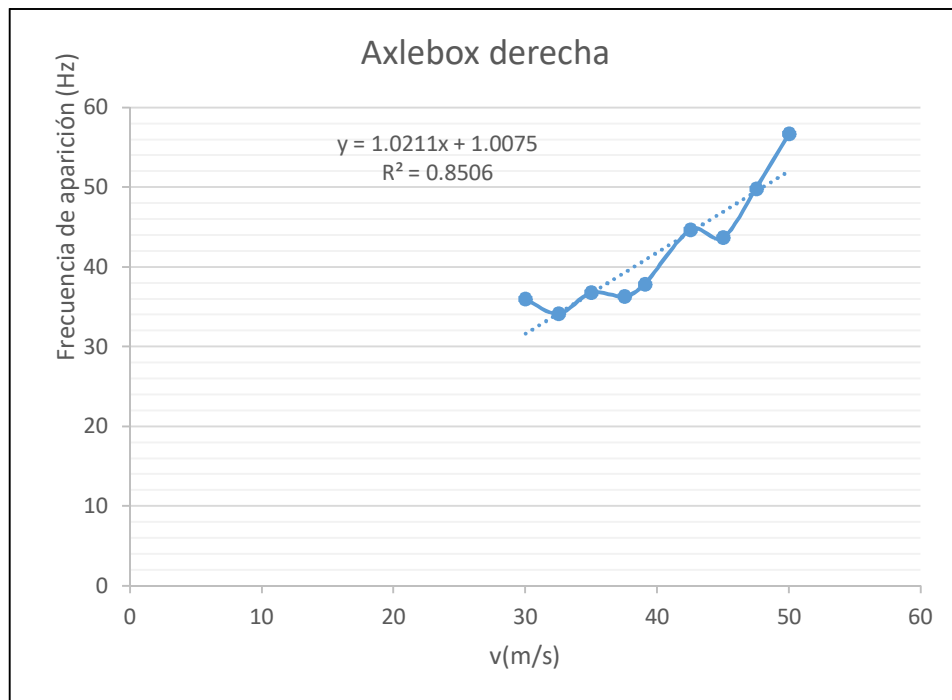
**Figura 5.33 Amplitud del pico triangular, caja de grasas izquierda**



**Figura 5.34 Frecuencia de aparición del pico triangular, caja de grasas izquierda**



**Figura 5.35 Amplitud del pico triangular, caja de grasas derecha**



**Figura 5.36 Frecuencia de aparición del pico triangular, caja de grasas derecha**

A la vista de los resultados expuestos anteriormente, se concluye que la frecuencia de aparición del valle es linealmente independiente en todos los puntos de estudio. Para el estudio de la amplitud del pico triangular se observa una fuerte dependencia lineal con respecto de la velocidad, mientras que la frecuencia a la que aparece dicho punto es totalmente independiente. De nuevo, se puede observar que las amplitudes que se obtienen en la caja de grasas derecha son considerablemente mayores que en el WSet y la caja izquierda.

## Capítulo 6

# Experimento con modelo avanzado

Una vez se ha realizado el primer experimento, el cual permite tomar un primer contacto tanto con el entorno de simulación como con el método de resolución y de cálculo del mismo, se realizará un ensayo similar con un vehículo más complejo y similar a modelos reales, en el que además, se registrarán datos para un mayor rango de velocidades, concretamente se llevarán a cabo simulaciones entre 0 y 56 m/s en intervalos de 4 m/s.

El nuevo modelo consta básicamente de una locomotora que remolca veinte vagones de pasajeros. Dentro de cada vagón se encuentran dos “bogies” con dos ejes cada uno. En cada uno de los ejes se añadirán posteriormente dos cajas de grasas, una en la rueda izquierda y otra en la derecha. Para la realización de este experimento, se registrarán los datos correspondientes al centro de masas del WSet y a las dos cajas de grasa. Posteriormente se llevará a cabo un análisis más detallado del modelo utilizado para el estudio.



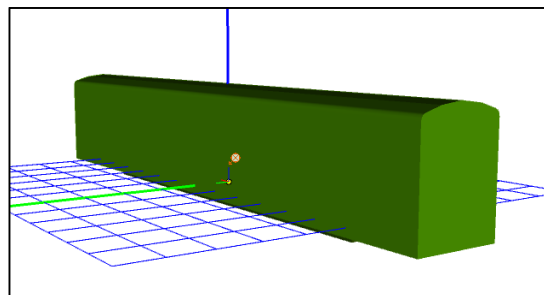
De nuevo, tras haber recogido los datos pertinentes, el objetivo de este experimento será el mismo que en el caso anterior, la búsqueda de dependencias lineales entre distintos parámetros del PSD de todos los puntos de estudio para el rango de velocidades elegido. Este modelo en concreto, en su configuración inicial, es posible encontrarlo en la base de datos que ofrece por defecto Universal Mechanism.

## 6.1 Modelo utilizado

El modelo que se utilizará para realizar las simulaciones en este segundo experimento se llama “PassengerCarExtR”, y forma parte de un conjunto mayor que también se encuentra en la base de datos de Universal Mechanism llamado “Passenger train 3D”. Dicho ferrocarril consta de una locomotora que remolca 20 vagones de pasajeros. Sin embargo, posteriormente, el objeto del cual se tomarán datos será únicamente el primero de estos vagones.

El vehículo consta de una caja cuya función en la simulación es meramente estética, y de todo el sistema de motorización y de rodadura del vehículo. Dicho sistema está formado por dos bogies motorizados, de dos ejes cada uno, con sus respectivas ruedas. A continuación se exponen más detalladamente cada uno de los principales componentes del modelo:

-*Carbody*: Se trata del elemento cuya función es el transporte de pasajeros y que conforma la gran mayoría de la masa suspendida del vehículo. Su modelización consiste en una caja sin ningún tipo de detalle para simplificar la carga de simulación del programa. A continuación se muestran una imagen de su apariencia y una tabla con las características de dicho componente:

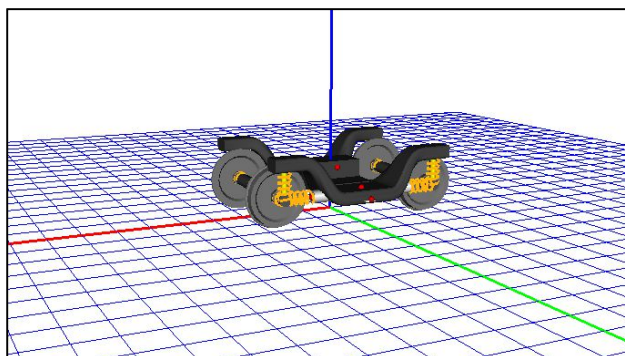


**Figura 6.1** Apariencia del coche de pasajeros, PassengerCarExtR

Masa de la caja:	32000 Kg.
Posición del centro de masas:	[0, 0, 0,7] (en el eje vertical)

**Tabla 6.1 Características del Carbody, PassengerCarExtR**

-*Bogies*: Son los elementos encargados de dotar de una estructura rígida al vehículo con el objetivo de establecer un nexo entre los ejes y la masa suspendida. En la siguiente imagen y posterior tabla se exponen una imagen del bogie y sus características principales:

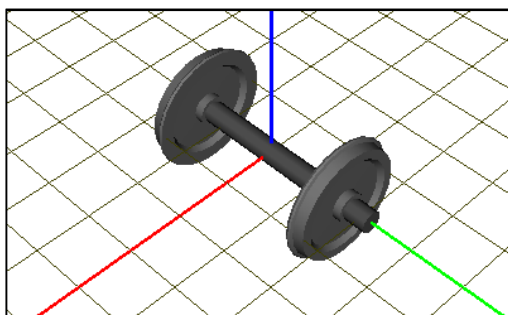


**Figura 6.2 Visualización del bogie, PassengerCarExtR**

Masa del bogie:	2615 kg
Coordenadas del centro de masas:	[0,0,0.6] (m)
Diagonal principal del tensor de inercia:	[1722, 1476, 3067] (kg·m <sup>2</sup> )

**Tabla 6.2 Características del bogie, PassengerCarExtR**

-*WheelSet*: Se trata del eje, que cuenta con dos ruedas caladas. El tren cuenta con dos WSet. Es uno de los elementos más importantes para realizar la simulación, ya que en su centro de masas se tomarán los datos de las vibraciones. A continuación se adjuntan las especificaciones técnicas más importantes:



**Figura 6.3 Visualización del WSet, PassengerCarExtR**

Radio de la rueda:	0,46 m.
Longitud del eje:	2,1 m.
Semibase:	0,75295 m.
Masa del WSet:	1813 Kg.
Diámetro del eje:	0,1 m.
Posición del WSet1: (Respecto del centro del vehículo)	[1,0,0.46] m.
Posición del WSet2: (Respecto del centro de masas del vehículo)	[1,0,-0.46] m.

**Tabla 6.3 Características del WSet, PassengerCarExtR**

El perfil de todas las ruedas del WSet corresponde con el perfil llamado “newlocow.wpf” proporcionado por el simulador.

-Axebox: Se trata de las cajas de grasas del vehículo. Estéticamente, el modelo es idéntico al usado por el modelo del experimento inicial, y es posible encontrarlo en las librerías de universal Mechanism. En este caso, el vehículo de estudio no dispone de cajas de grasas, por lo que será necesario introducirlas manualmente. De este modo, dichos elementos serán incorporados con las siguientes características físicas:

Momento de inercia en el eje y:	3 kg·m <sup>2</sup>
Posición respecto del centro del bogie:	[1.28, 1.1, 0.46] m

**Tabla 6.4 Características de las caja de grasas**

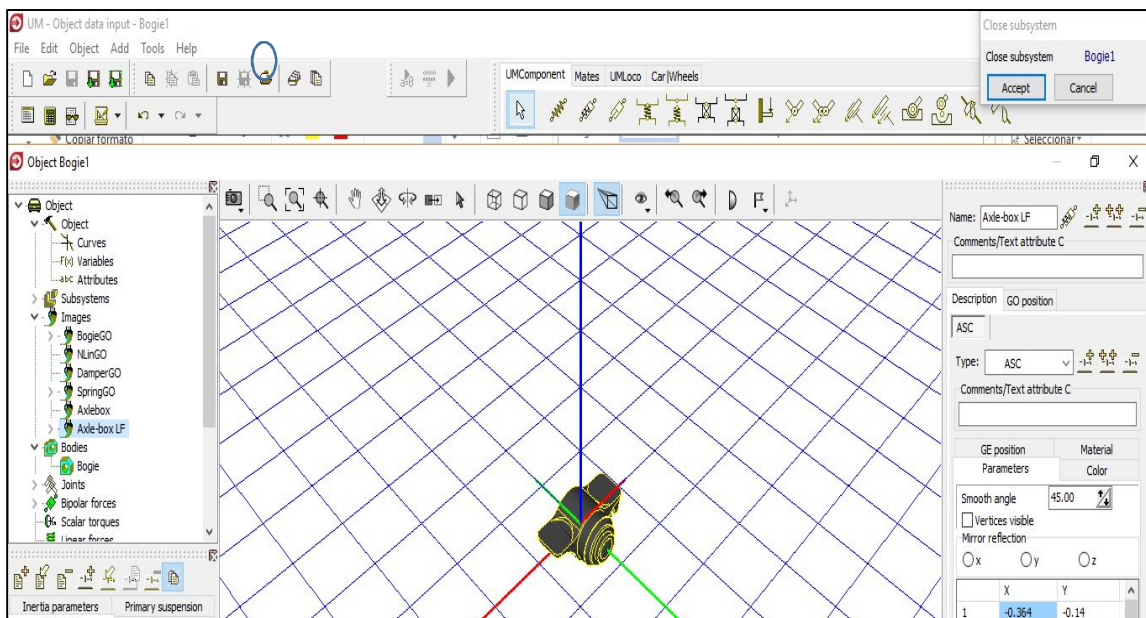
La posición especificada corresponde con la caja de grasas izquierda delantera. La posición del resto de cajas del bogie se obtienen poniendo el valor “x” o el valor “y” en negativo según corresponda.

## 6.2 Introducción de las cajas de grasa

Dado que la configuración inicial del modelo “PassengerCarExtR” no contiene cajas de grasa en ninguno de sus ejes, es necesario acceder a dicho modelo con el módulo UM Input para poder añadir esos elementos en todas y cada una de sus ruedas. Para ello, se ha seguido el tutorial proporcionado en la página web de Universal Mechanism, en concreto el capítulo 8.1.4 del manual UM-Loco.

Las cajas de grasa serán añadidas como un sólido rígido. Para ello, el primer paso, una vez haya sido cargado el modelo, será acceder al bogie en el cual se haya decidido introducir el elemento por medio de la ventana del árbol de elementos.

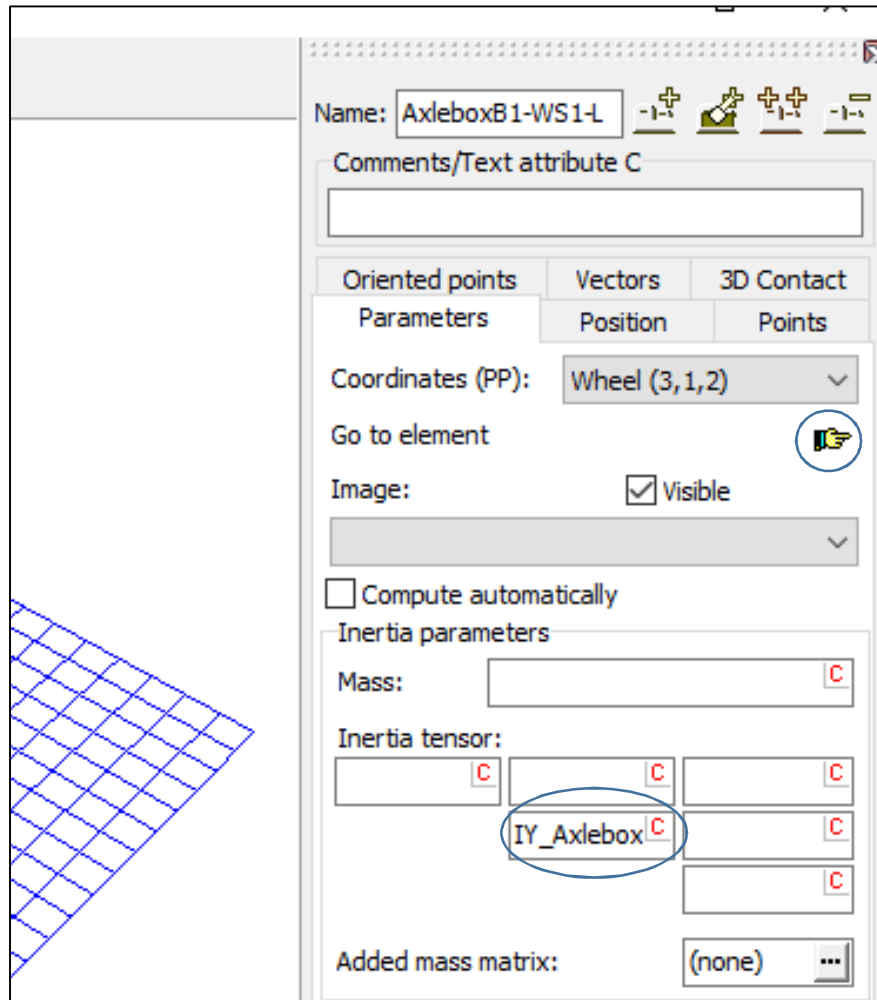
Una vez se haya llevado a cabo el primer paso, como paso opcional, se cargará en el programa la imagen de las cajas de grasa, para poder añadirlas también como elemento gráfico. Para ello, primero se debe cargar la imagen, a través del botón “Read element from file” del menú principal. Una vez cargada, dispondremos de esa imagen para utilizarla en cualquier sólido rígido que queramos añadir al sistema. En la imagen inferior, se muestra una previsualización de la caja de grasa, con todos los botones necesarios para seguir estas instrucciones señalados.



**Figura 6.4** Previsualización de la caja de grasa

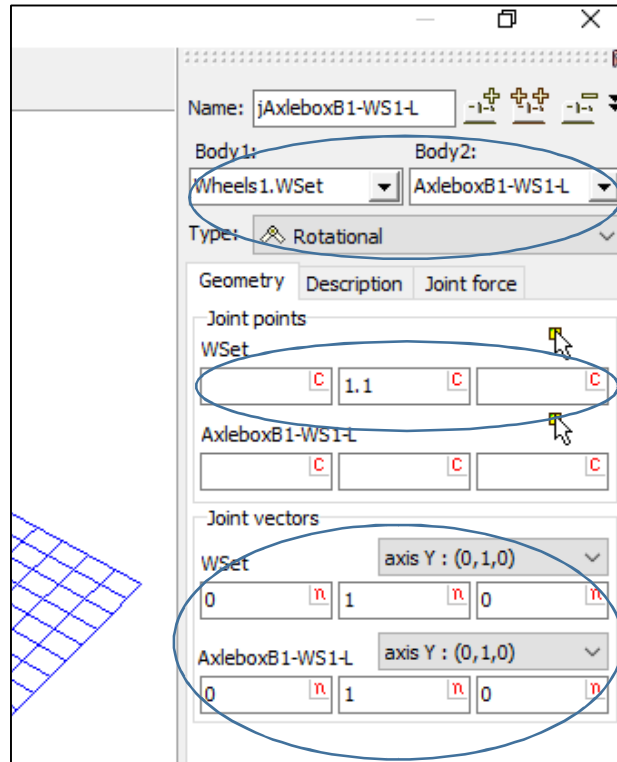
Una vez se ha cargado la imagen como elemento gráfico, debe añadirse el sólido rígido correspondiente. Para ello, se abre el desplegable “Bodies” de la ventana de elementos, y se pincha en añadir nuevo elemento. Dicho elemento será la caja de grasas, y se nombrará de la manera especificada al final de este capítulo.

Para introducir correctamente la caja de grasas se deben configurar todos los parámetros del inspector de datos que se pueden ver en la siguiente figura:



**Figura 6.5 Configuración del inspector de datos**

El valor de inercia “IY\_Axlebox” tiene un valor numérico de  $3\text{kg}\cdot\text{m}^2$ . Para fijar la posición del elemento hay que pinchar en el icono de la mano y seleccionar “Create Joint” y unirlo al WheelSet correspondiente. Una vez se ha creado la restricción, se debe acceder a ella en el árbol de elementos, y configurar los siguientes parámetros:



**Figura 6.6 Configuración de la restricción**

En el apartado “WSet”, el valor numérico introducido vale 1.1m o -1.1m para las cajas de grasas izquierda y derecha respectivamente.

Para llevar a cabo una correcta identificación de cada elemento, se utilizará la siguiente nomenclatura a la hora de nombrar a cada una de las cajas:

$$\text{Axebox}BX\text{-WSX-X}$$

Donde la “B” hace referencia al bogie en el que se encuentra el elemento, la “WS” al eje correspondiente y la letra final se nombrará “L” o “R” dependiendo de si se trata de la caja de grasa izquierda o derecha (“Left” o “Right”).

### 6.3 Trayecto simulado

El trayecto simulado en para este conjunto de experimentos se corresponde con el utilizado para el primer estudio, por lo que para obtener la información relativa a dicho recorrido, véase el capítulo 5.2 de este proyecto.

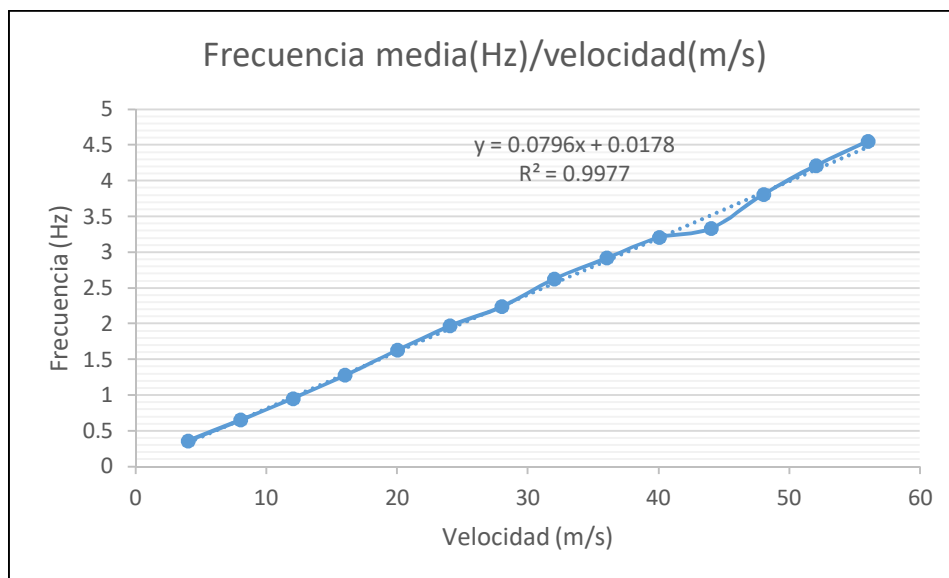
## 6.4 Configuración de Universal Mechanism

La configuración del “solver” empleado por el programa no cambia respecto de la utilizada para el primer experimento, por lo tanto, para obtener la información acerca de dicha configuración, véase el capítulo 5.3 de este proyecto.

## 6.5 Resultados

A lo largo de este capítulo se expondrán todos los resultados obtenidos de los datos extraídos del tramo con irregularidades del conjunto de simulaciones que componen este experimento. De manera general, se observará más adelante que la evolución en función de la velocidad de los tres primeros armónicos tiene la misma independencia del elemento en el que se estén tomando datos, por lo que se omitirán aquellas gráficas que no aporten ninguna información diferente.

Previamente a la exposición de los resultados propiamente dichos, se comprobará que la frecuencia media entre armónicos se corresponde con la frecuencia a la que aparecen las irregularidades. En la gráfica inferior se exponen dicha frecuencia frente a la velocidad:

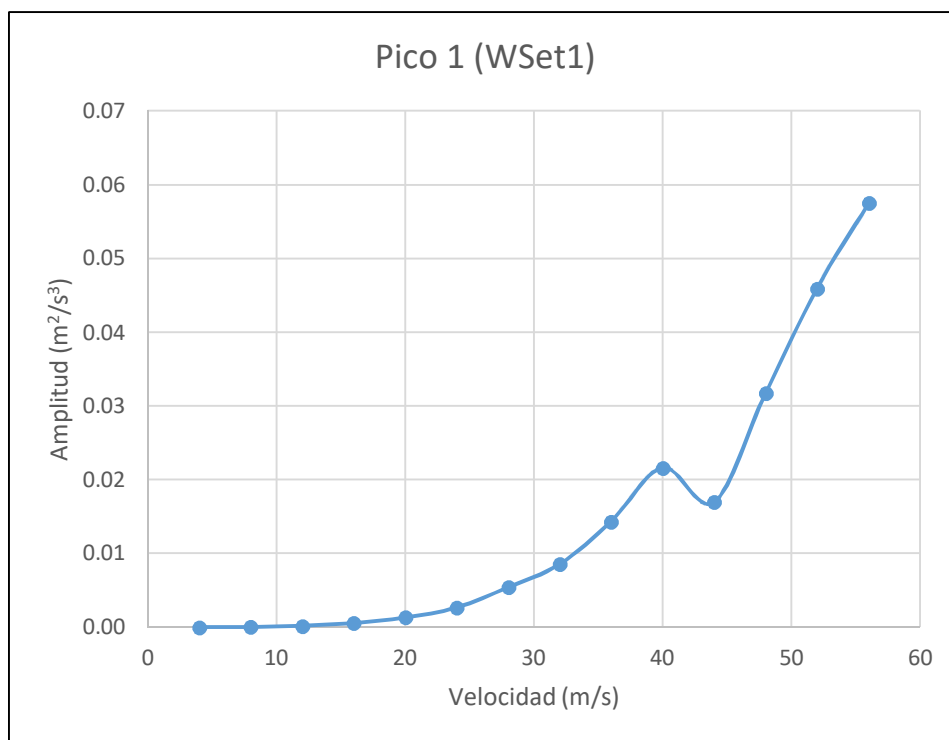


**Figura 6.7 Frecuencia media entre armónicos en función de la velocidad**

$$f(x) = abs \left| \sin \left( \frac{\pi x}{12.5} \right) \right| = \sin \left( \frac{\pi \cdot v \cdot t}{12.5} \right) = \sin(\pi \cdot f \cdot t) \rightarrow f = \frac{v}{12.5}$$

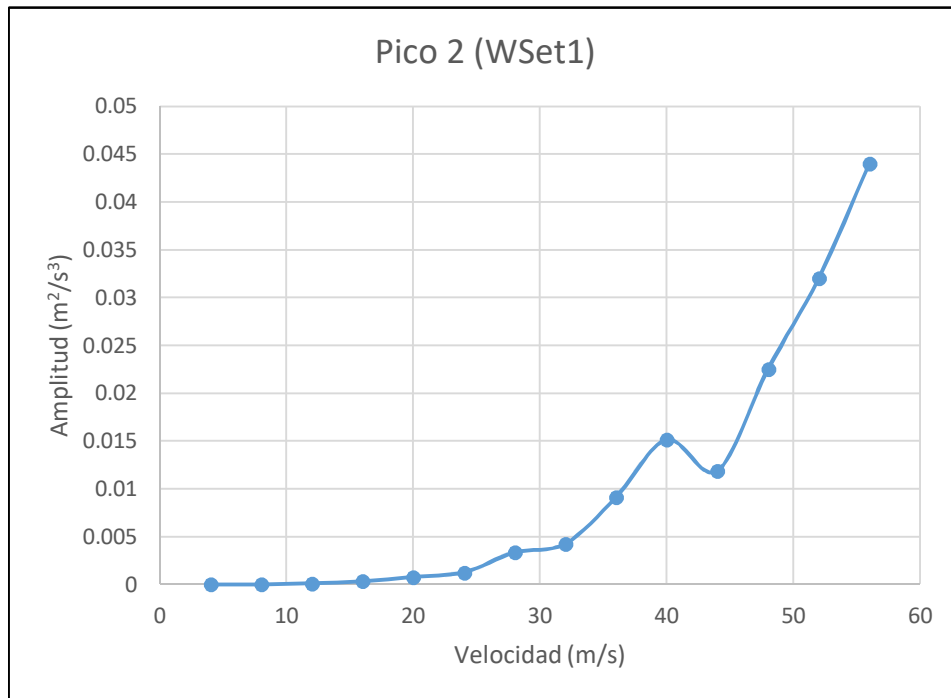
Una vez realizada esta comprobación inicial, que demuestra que el trayecto está bien configurado, se procede a la exposición del resto de resultados obtenidos, los cuales se dividirán en tendencias según la velocidad para cada elemento en concreto, y tendencias para una velocidad constante de la evolución de los tres primeros armónicos en cada elemento.

Para el primer caso, la comparativa de la evolución de las velocidades en cada uno de los elementos, únicamente se expondrán las correspondientes al primer eje del primer bogie, y sus respectivas cajas de grasa, ya que el comportamiento de sus armónicos es representativo de lo que sucede en el resto de elementos. También se incluirá una gráfica comparando la amplitud del primer armónico para los elementos anteriormente citados.

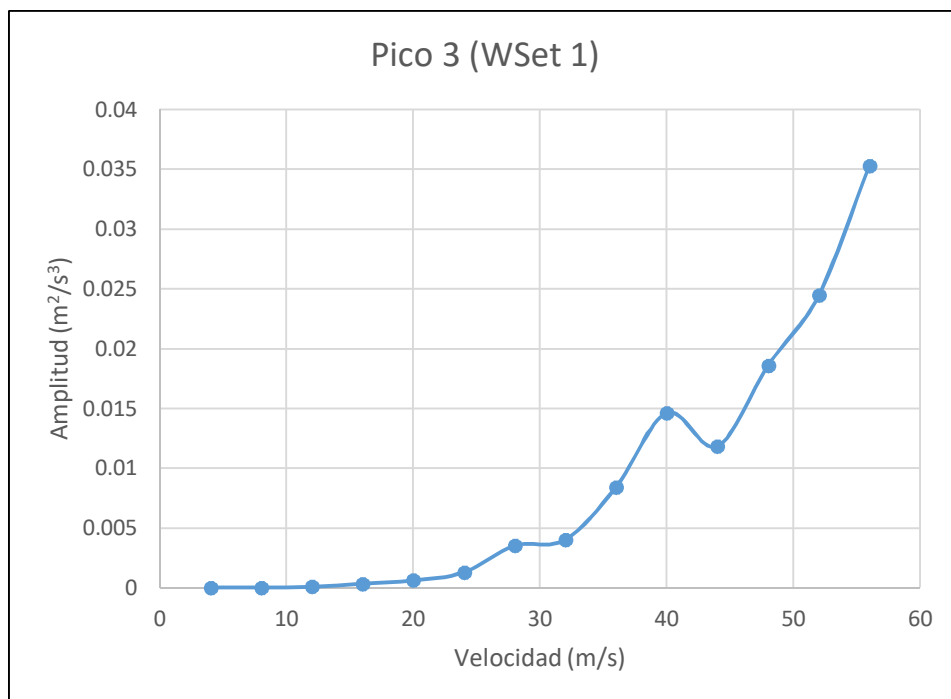


**Figura 6.8 Valor del primer armónico según la velocidad, WSet1**

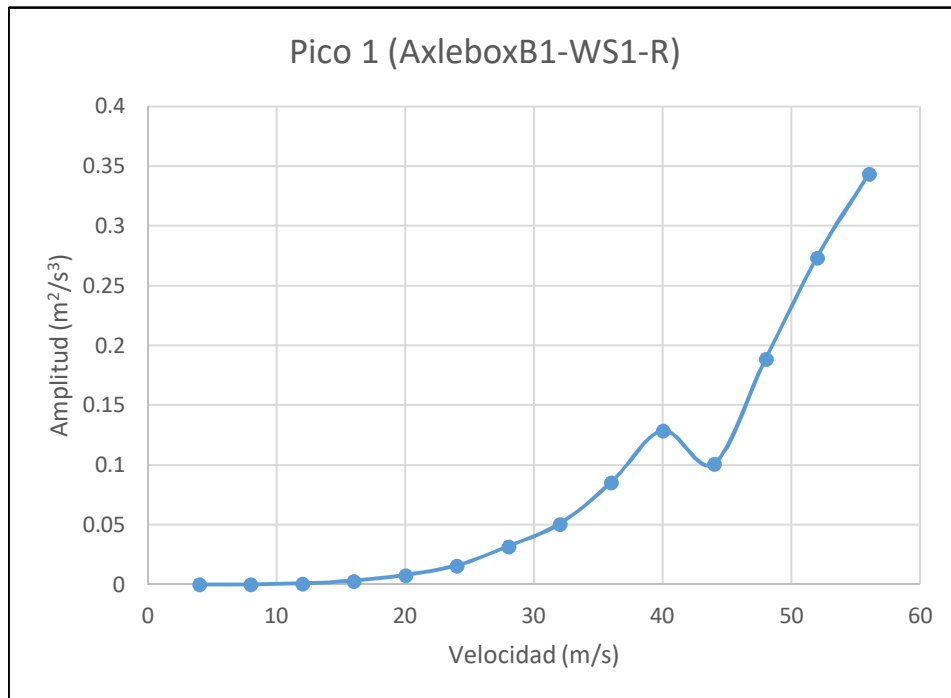




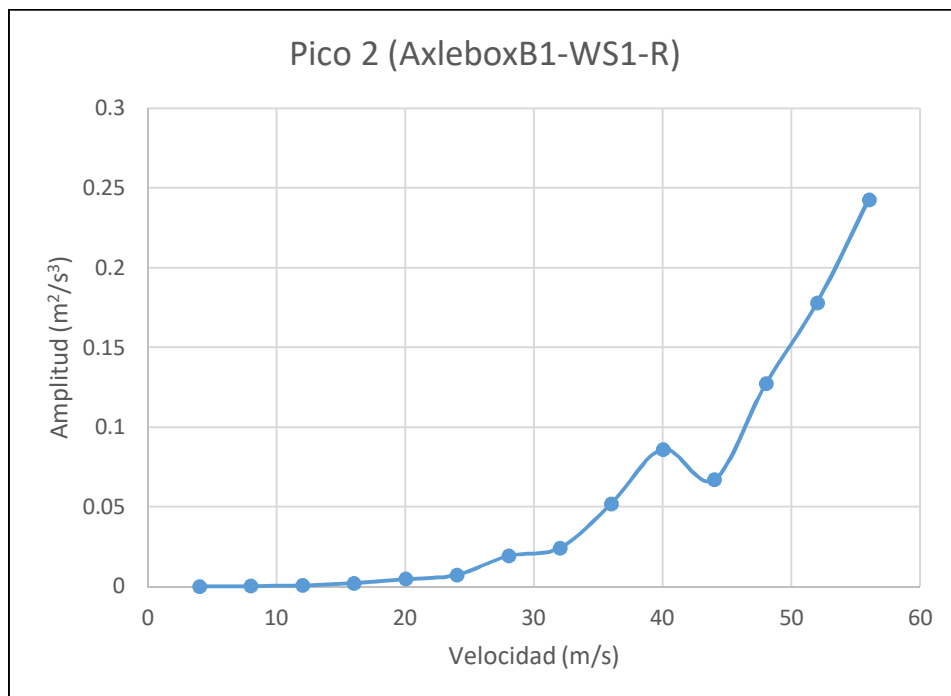
**Figura 6.9** Valor del segundo armónico según la velocidad, WSet1



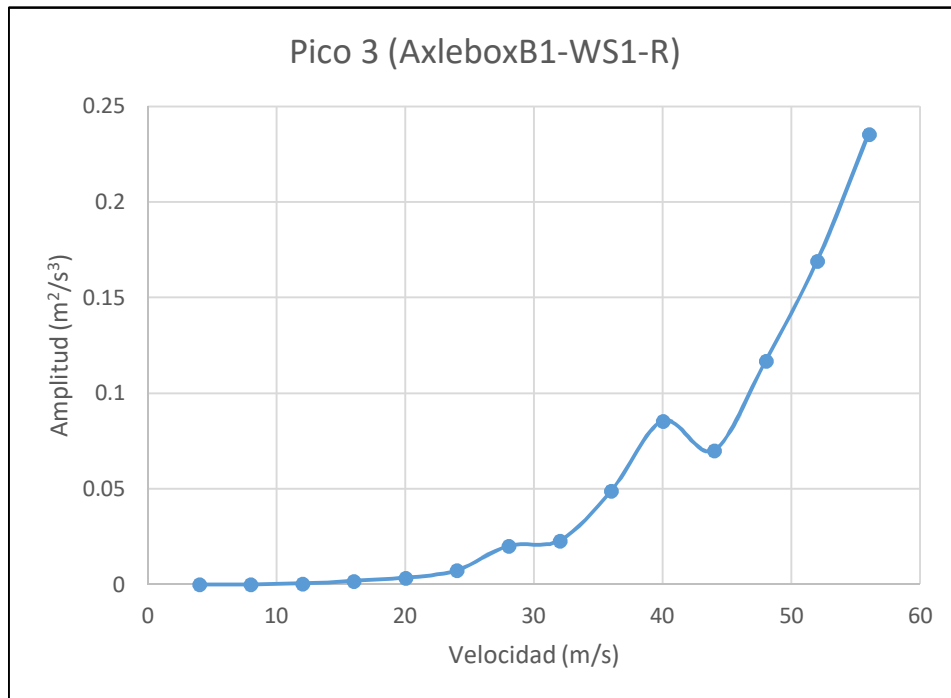
**Figura 6.10** Valor del tercer armónico según la velocidad, WSet1



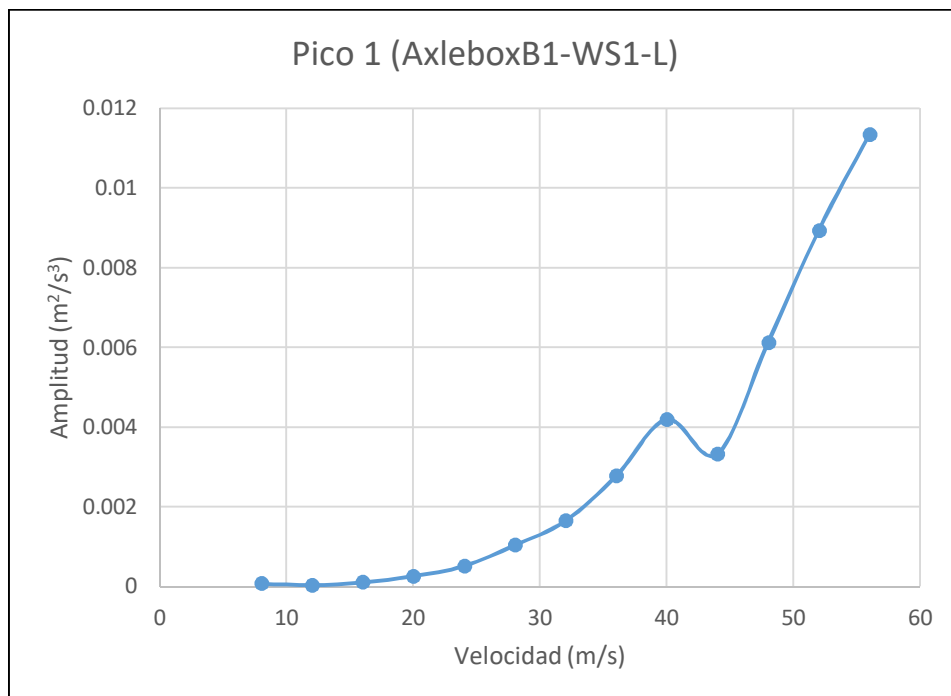
**Figura 6.11** Valor del primer armónico según la velocidad, caja de grasas derecha, WSet1



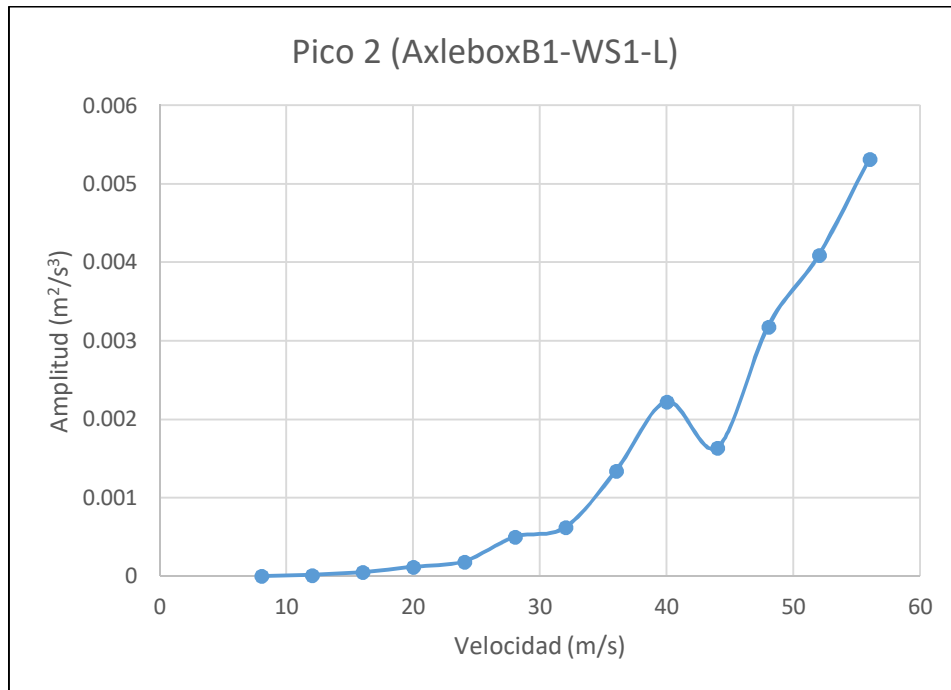
**Figura 6.12** Valor del segundo armónico según la velocidad, caja de grasas derecha, WSet1



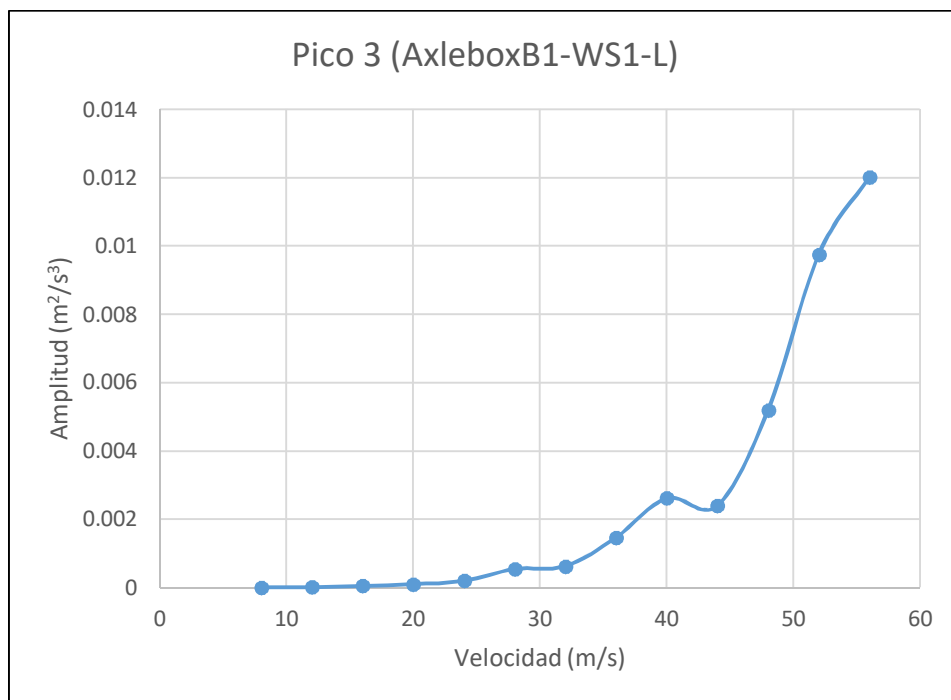
**Figura 6.13** Valor del tercer armónico según la velocidad, caja de grasas derecha, WSet1



**Figura 6.14** Valor del primer armónico según la velocidad, caja de grasas izquierda, WSet1

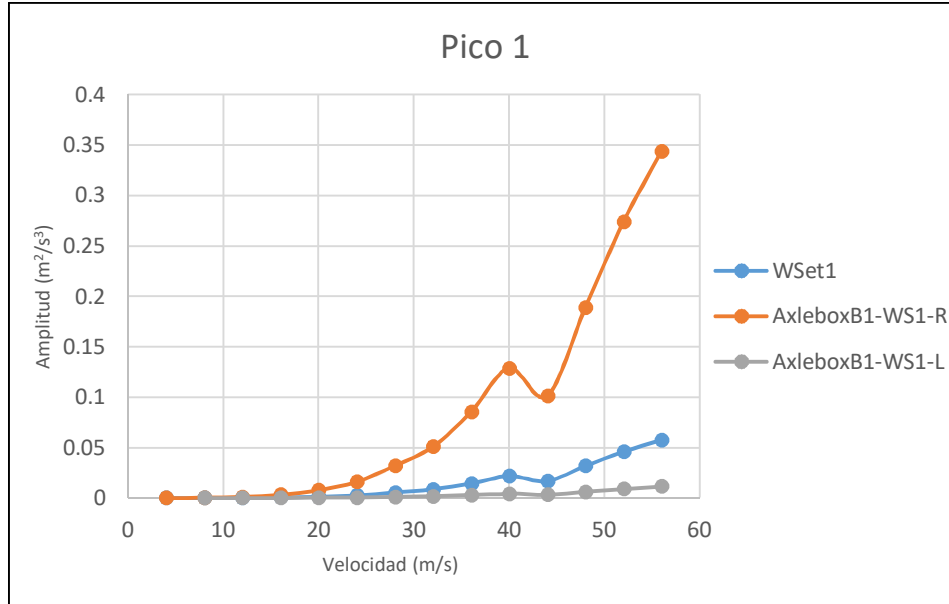


**Figura 6.15** Valor del segundo armónico según la velocidad, caja de grasas izquierda, WSet1



**Figura 6.16** Valor del primer armónico según la velocidad, caja de grasas izquierda, WSet1

A continuación, se adjunta también una gráfica para ilustrar la diferencia de amplitud entre cada una de los puntos del eje para el primer armónico. El fenómeno observado se repite para el resto de picos:



**Figura 6.17 Comparativa del valor del primer armónico en el primer eje**

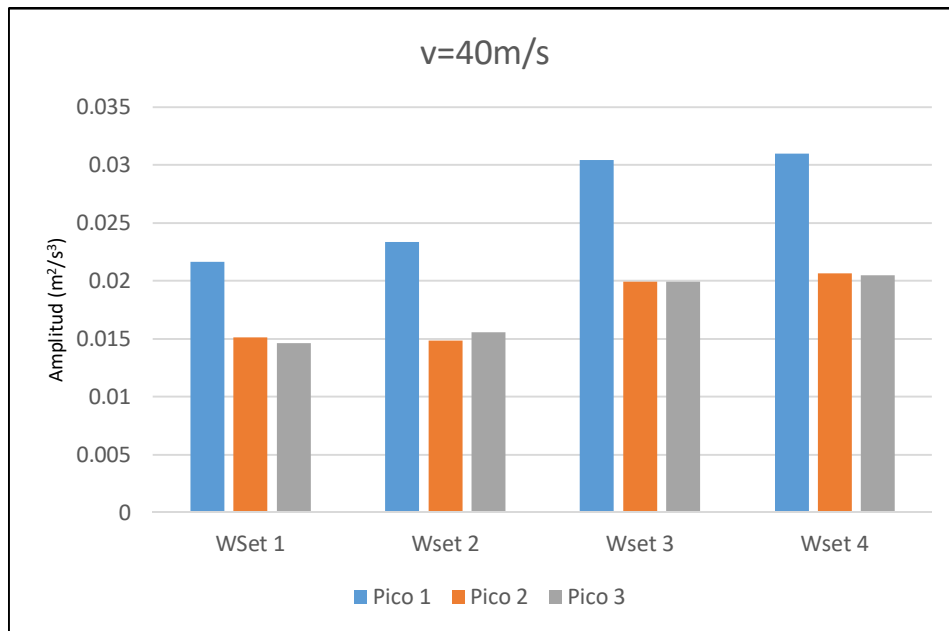
Una vez expuestas todas las gráficas correspondientes al primero de los ejes, incluyendo tanto las relativas al centro de masas del WSet, como a sus respectivas cajas de grasas, se observan los siguientes hechos:

- La línea de tendencia es prácticamente idéntica en todos y cada uno de los armónicos, y para todos los elementos que se han decidido observar. La única diferencia que se observa es de amplitud, siendo esta más alta cuanto más cerca está el punto de la irregularidad. De este modo, la amplitud del primer armónico es mayor en el centro de masas del WSet que en la caja de grasas izquierda, y a su vez, menor que en la caja derecha.

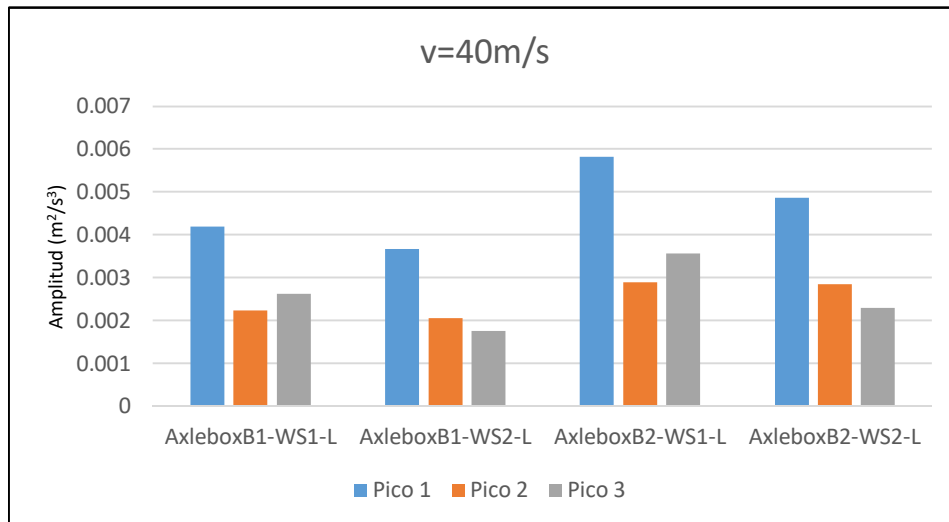
- La tendencia general del valor de la amplitud conforme aumenta la velocidad del vehículo es creciente, de una manera exponencial. Se observa una irregularidad en 44 m/s, donde dicho valor disminuye en todas las gráficas. Se supone que dicho fenómeno podría estar asociado con la velocidad crítica del vehículo.

-También se observa que en las gráficas de la caja de grasas izquierda, no existe valor para la velocidad de 4 m/s. Esto es debido a que la densidad espectral de potencia a esa velocidad es totalmente irregular y no existe una identificación clara de ninguno de los picos. Este fenómeno se supone que podría estar causado por la baja velocidad de circulación del vehículo, combinado con la inexistencia de irregularidades en el carril izquierdo, lo cual impide que se pueda tomar la medida de ninguna vibración de amplitud significativa.

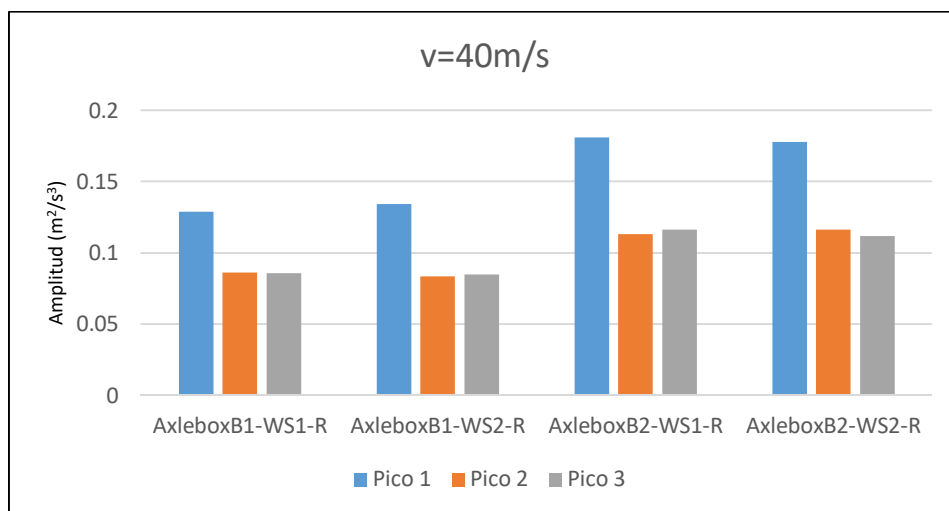
A continuación se exponen las gráficas en las cuales se analizan los tres picos para cada elemento con una velocidad constante. Como pictogramas representativos se han seleccionado aquellos correspondientes a las velocidades de 36 y 40 m/s. De este modo, las imágenes se dividirán según elementos similares a lo largo del vehículo, es decir, en una gráfica se agruparán los tres picos de todas las cajas de grasas izquierdas, en otro los de todas las derechas, y así sucesivamente:



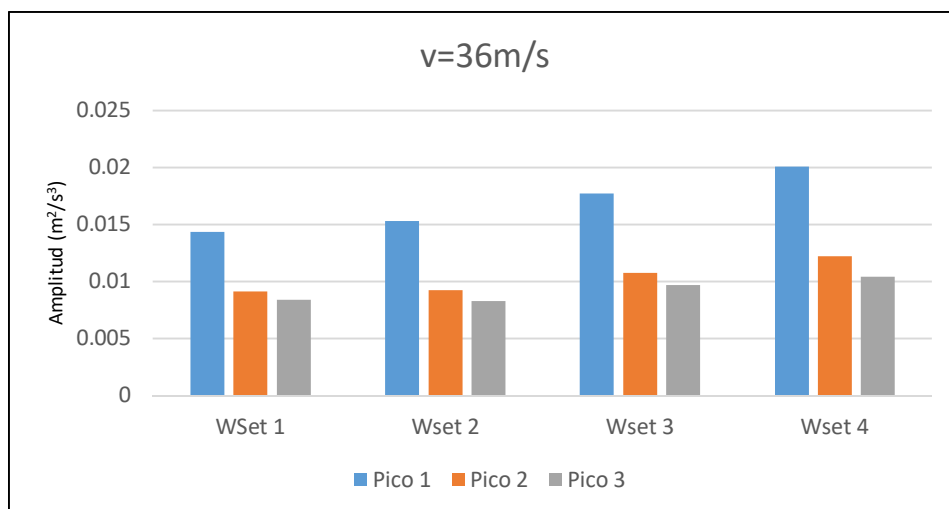
**Figura 6.18 Armónicos en los ejes a 40m/s**



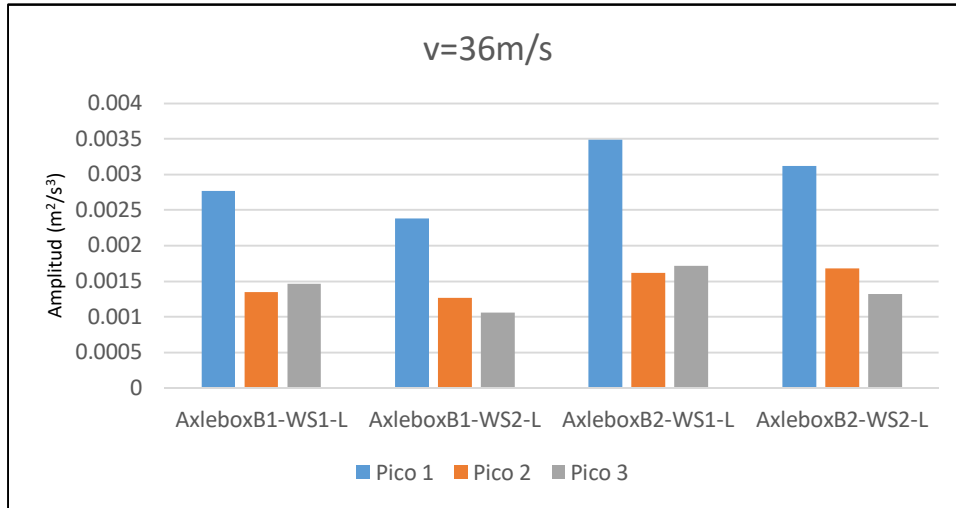
**Figura 6.19 Armónicos en las cajas de grasa izquierdas a 40m/s**



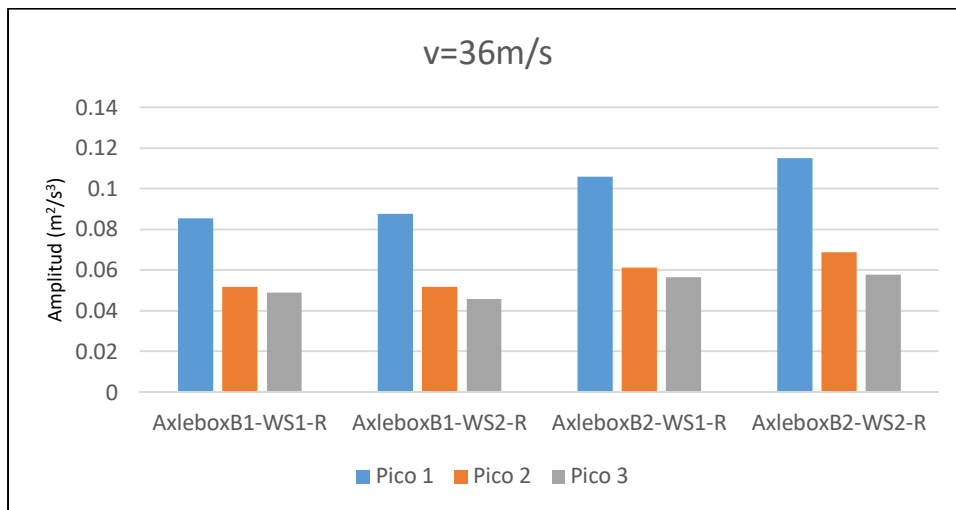
**Figura 6.20 Armónicos en las cajas de grasa derechas a 40m/s**



**Figura 6.21 Armónicos en los ejes a 36m/s**



**Figura 6.22 Armónicos en las cajas de grasa izquierdas a 36m/s**



**Figura 6.23 Armónicos en las cajas de grasa derechas a 36m/s**

Una vez se han expuesto todas las gráficas pertinentes, y que permiten formarse una idea general de los patrones seguidos por los armónicos en función del punto del vehículo en el que se realice la observación, se constatan los siguientes hechos:

- Se observa que en todas las gráficas, el valor del primer armónico es mayor en la mitad posterior del vehículo. Quizá este fenómeno esté causado por la suma de la inestabilidad causada por la irregularidad y la formada previamente en la primera mitad del vehículo.

- Se observa que, tomando velocidades distintas, la evolución de los armónicos en cada uno de los laterales es prácticamente idéntica. De este modo, se puede decir que el primer armónico en el eje aumenta siempre según avanzamos en el vehículo. También se



---

identifica un patrón en la caja de grasas izquierda, conforme avanzamos longitudinalmente, el segundo armónico disminuye, el tercero aumenta de nuevo, y el cuarto vuelve a disminuir ligeramente.

-Se constata el hecho de que el armónico más significativo es el primero, en todas las gráficas, siendo mayor su amplitud en todos los casos que la del segundo y tercer pico. De hecho, los armónicos segundo y tercero mantienen casi su valor. El único caso en el cuál su variación es significativa es en la caja de grasas izquierda, y esto se debe a que el orden de magnitud general de las vibraciones es muy pequeño.

## Capítulo 7

### Presupuesto

Este capítulo abarca todo lo referente a los costes que ha supuesto la realización de este proyecto, incluyendo los costes tanto de material como de personal durante los 4 meses de realización del estudio. Se pueden desglosar los costes en tres bloques principales, a saber: Equipo informático utilizado, horas de personal consumidas y licencias necesarias para la ejecución del proyecto. En este caso el coste de licencias de Universal Mechanism no será imputable al haber sido posible la realización completa del experimento con la licencia de prueba, debido al carácter universitario del proyecto. El paquete ofimático también es proporcionado por Microsoft como licencia de estudiante.

El equipo informático está constituido únicamente por un ordenador portátil, modelo “Toshiba Satellite Pro A50-C-208” valorado en 870 €, cuya vida estimada es de 36 meses, y que se utiliza durante los 4 meses que abarca la elaboración del proyecto.

Las horas de personal dedicadas a la ejecución del estudio se pueden dividir de la siguiente manera: 40 horas empleadas en la búsqueda de información y autoaprendizaje de la aplicación informática utilizada, 140 horas destinadas a la realización de los

experimentos pertinentes y su correspondiente procesado posterior, y finalmente 40 horas utilizadas para la redacción de la memoria. Basándose en la dificultad y los conocimientos necesarios para la correcta elaboración del estudio, se estima el sueldo por hora de personal en 20 €.

Se considera como despreciable el coste asociado al material de oficina empleado, por lo que no incide en ninguna cuantía en el presupuesto.

En la tabla que se expone a continuación se desglosan de manera esquemática todos los costes asociados a la ejecución del proyecto:

<b>Equipo informático</b>			
<i>Descripción</i>		<i>Coste (€)</i>	<i>Coste imputable (€)<sup>1</sup></i>
Toshiba Satellite Pro A50-C-208		870.00	96.67
<b>Software</b>			
<i>Descripción</i>		<i>Coste (€)</i>	<i>Coste imputable (€)<sup>1</sup></i>
Microsoft Office		0.00	0.00
Universal Mechanism		0.00	0.00
<b>Coste de personal</b>			
<i>Descripción</i>	<i>Horas</i>	<i>Coste (€/h)</i>	<i>Coste imputable (€)</i>
Documentación	40	20.00	800.00
Ingeniería	140	40.00	5600.00
Elaboración de la memoria	40	20.00	800.00
<i>Descripción</i>	<i>Coste imputable (€)</i>		
Coste bruto	7296.67		
Costes indirectos (10%)	729.67		
Coste total	8026.34		
Impuestos (21%)	1685.53		
Coste total imputable	9711.87		

<sup>1</sup> La depreciación se calcula en 36 meses, de los cuales son imputables 4

**Tabla 7.1 Presupuesto del proyecto**

---

Finalmente, desglosados y calculados todos los gastos imputables a la realización del proyecto, se debe añadir un 10% asociado a costes indirectos. El coste total, incluyendo dichos gastos, asciende a 8026.34 €.

Tras calcular el presupuesto total, debe aplicarse la tasa por impuestos del 21%, cuyo valor es de 1685.53 €, y que eleva el presupuesto final a la suma de 9711.87 €.

## Capítulo 8

# Conclusiones

Para finalizar este Trabajo Fin de Grado, se procederá a lo largo de este capítulo a realizar una evaluación del trabajo realizado y se expondrán las principales conclusiones de los resultados obtenidos. También se dedicará un apartado al análisis de los trabajos futuros que podrían elaborarse a partir de este Trabajo Fin de Grado.

### 8.1 Conclusiones

En primer lugar, debe mencionarse que se ha cumplido con los objetivos propuestos, tanto el objetivo principal de realizar *“el estudio analítico de la evolución con la velocidad de las principales componentes de la gráfica de la densidad espectral de potencia, obtenida a partir de las vibraciones verticales tomadas en el centro del eje montado y en las cajas de grasas de un tren operando con distintas configuraciones de trayectos”*, como todos los objetivos intermedios.

De este modo, es importante destacar la posibilidad de realizar un estudio similar para dos modelos distintos de una manera relativamente sencilla que brinda Universal Mechanism, gracias a las amplias librerías de las que dispone en su base de datos, por lo que se concluye que ha sido correcta la elección de dicho software de simulación para la elaboración del proyecto, y es importante la realización de más trabajos en el futuro, de modo que por medio de comparaciones con medidas reales, se pueda mejorar la aplicación y convertirla en un software cada vez más fiable para la realización de experimentos.

En cuanto a los resultados obtenidos, se concluye que:

- Para los experimentos realizados con los dos modelos de dispositivos ferroviarios, tanto en el modelo que cuenta únicamente con dos ejes, como en el modelo que dispone de dos bogies con dos ejes cada uno, los patrones de crecimiento y decrecimiento de la evolución de los armónicos de la PSD son muy similares en ambos casos.
- Se comprueba, también en ambos casos, la correcta ejecución del experimento por medio de las figuras 5.23 y 6.7, siendo la separación media entre picos lineal y correspondiente con la frecuencia a la que el vehículo pasa por cada uno de los picos de las irregularidades del carril derecho.
- La tendencia de la amplitud del primer armónico es creciente con la velocidad en todos los casos, como cabría esperar, debido a una mayor velocidad de impacto con cada irregularidad. En el segundo modelo, en el cual se toman medidas para toda la extensión longitudinal del tren, se observa también que la magnitud del primer pico aumenta conforme se avanza hacia la parte posterior del ferrocarril.
- Se observa también que la amplitud en general de la PSD es mayor conforme el punto de estudio se acerca al carril que contiene las irregularidades, que en esta configuración de trayecto es el derecho. De este modo, dicha magnitud es mayor para el centro de masas del eje que para la caja de grasa izquierda, y a su vez es menor que la correspondiente a la caja de grasa derecha.

---

## 8.2 Trabajos futuros

En cuanto al impacto y a los trabajos que podrían elaborarse en el futuro a partir de la investigación realizada a lo largo de este proyecto:

- En primer lugar, las conclusiones extraídas de la realización de las simulaciones sobre vehículos ferroviarios expuestas anteriormente, podrían servir como base para posteriores estudios sobre modelos distintos, con distintas configuraciones, y de este modo comprobar si el comportamiento de los trenes es similar para más modelos.
- En segundo lugar, también sería interesante la realización de simulaciones ferroviarias con más configuraciones de la vía, como puede ser la circulación en curva, con una cierta inclinación o declinación del terreno, o variando parámetros característicos del vehículo, como el diámetro de las ruedas.
- Por último, en este proyecto se realiza un análisis de los patrones existentes con la variación de la velocidad de los valores característicos de las gráficas de la densidad espectral de potencia, pero sin analizar a que fenómeno físico se encuentran asociadas dichas observaciones, por tanto, podría ser interesante la realización de un análisis donde se relacionen el valor de los armónicos con una ley analítica.

## Referencias

- [1] A. L. Pita, El AVE Madrid-Lisboa por Extremadura: efectos territoriales y diferentes alternativas. Tesina, Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- [2] «Rajoy anuncia que la inversión en trenes AVE será de 1.300 millones de euros». *El País, Edición digital*, 21/04/2017.
- [3] Normativa técnica de ferrocarriles, «Ministerio de fomento,» [En línea]. Available: <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/3049E22F-9B6C-414D-B73F-7BC2B0F8D2F1/121482/NORMATIVADGIF00.pdf>. [Último acceso: Julio 2017].
- [4] Normativa relativa a vehículos y su mantenimiento, «Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria,» [En línea]. Available: [http://www.seguridadferroviaria.es/AESF/LANG\\_CASTELLANO/NORMATIV A/NN/NRVM/](http://www.seguridadferroviaria.es/AESF/LANG_CASTELLANO/NORMATIV A/NN/NRVM/). [Último acceso: Septiembre 2017].
- [5] UNE-En13262:2005+A2:2011, UNE-EN 61373:2011, UNE-EN 13129:2017, UNE-EN 14363:2017, UNE-EN 16729-1:2016, «AENOR,» [En línea]. Available: <https://www.aenor.es/aenor/normas/buscadornormas/resultadobuscnormas.asp#.Wb68rMhJbIU>. [Último acceso: Septiembre 2017].



- 
- [6] Antonio Gauchía Babé, Daniel García-Pozuelo Ramos, Beatriz López Boada, M<sup>a</sup> Jesús López Boada, Julio Fuentes Losa, Esther Olmeda Santamaría, Vicente Díaz López, Automóviles y ferrocarriles, UNED, 2012.
- [7] Página web oficial de «Universal Mechanism,» [En línea]. Available: <http://www.universalmechanism.com/en/pages/index.php?id=1>. [Último acceso: Julio 2017].
- [8] M. Laporte, Estudio y simulación del contacto rueda-raíl en un sistema multicuerpo ferroviario, Trabajo Fin de Máster, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, 2017.
- [9] Universal Mechanism, Manual de ayuda de Universal Mechanism [En línea] "03\_UM\_Data\_Input\_Program".
- [10] Universal Mechanism, Manual de ayuda de Universal Mechanism [En línea] "04\_UM\_Simulation\_Program".
- [11] Universal Mechanism, Manual de ayuda de Universal Mechanism [En línea] "08\_UM\_Loco".
- [12] Universal Mechanism, Manual de ayuda de Universal Mechanism [En línea] "15\_UM\_Train".
- [13] Universal Mechanism, Manual de ayuda de Universal Mechanism [En línea] "15\_UM\_Automotive".
- [14] «Página web del programa Simpack,» [En línea]. Available: [http://www.simpack.com/industrial\\_sectors\\_rail.html](http://www.simpack.com/industrial_sectors_rail.html). [Último acceso: Agosto 2017].
- [15] «Página web del programa MSC Adams,» [En línea]. Available: <http://www.mscsoftware.com/product/adams>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [16] «Página web de la compañía Resonate,» [En línea]. Available: <http://www.resonate.tech/ui/content/content.aspx?id=7>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [17] «Página web del programa Vampire,» [En línea]. Available: <http://www.vampire-dynamics.com/>.
- [18] «Página web de MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab/whatsnew.html>. [Último acceso: Agosto 2017].
- [19] S. Braun, Procesamiento de señales, guía interactiva para ingenieros, UNED, 2012.
-

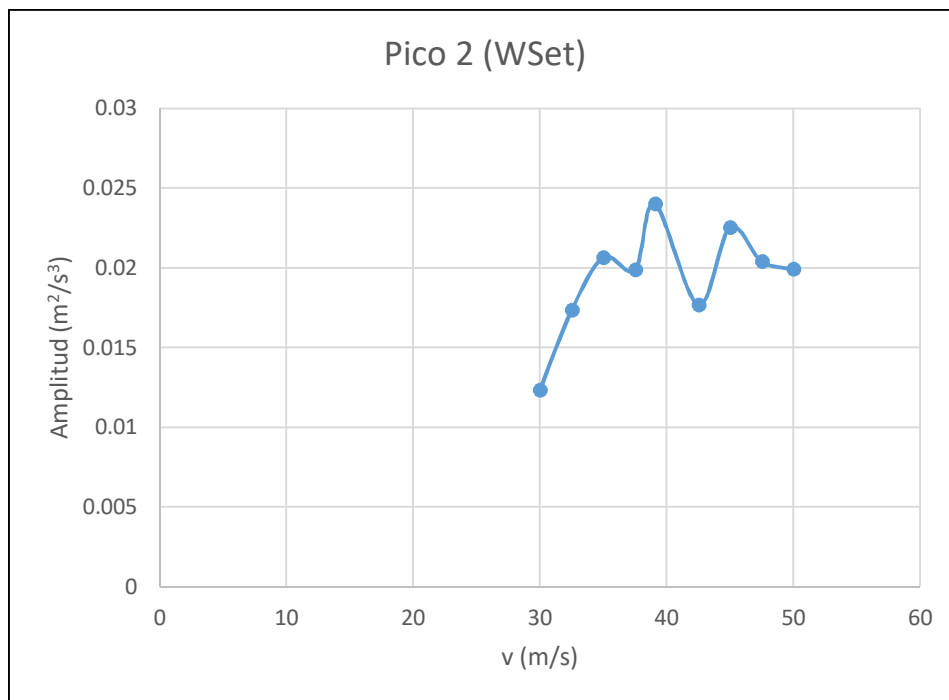
- 
- [20] «Imagen del perfil de vía R65,» [En línea]. Available:  
<http://valente1919.com/en/rails/item/rail-p65-r65.html>.

## Capítulo 8

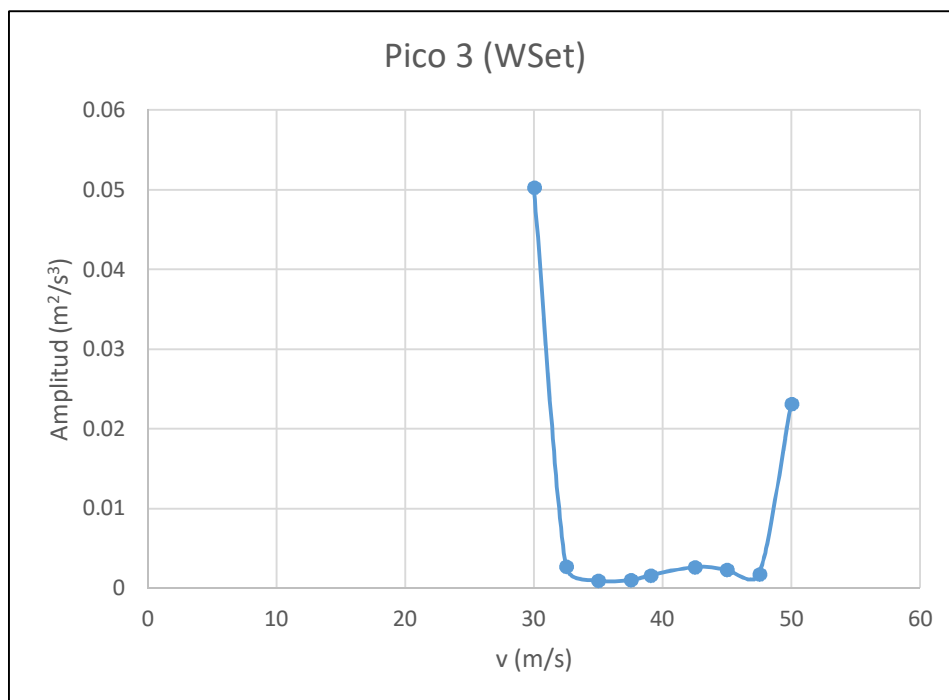
### Anexos

En este capítulo se adjuntan todas las gráficas que se omitieron en el cuerpo principal de la memoria en ambos experimentos sobre vehículos ferroviarios debido a su alto grado de similitud con el resto de gráficas expuestas. La exposición de las gráficas anteriormente mencionadas comienza en la página siguiente.

## 8.1 Anexos del experimento básico



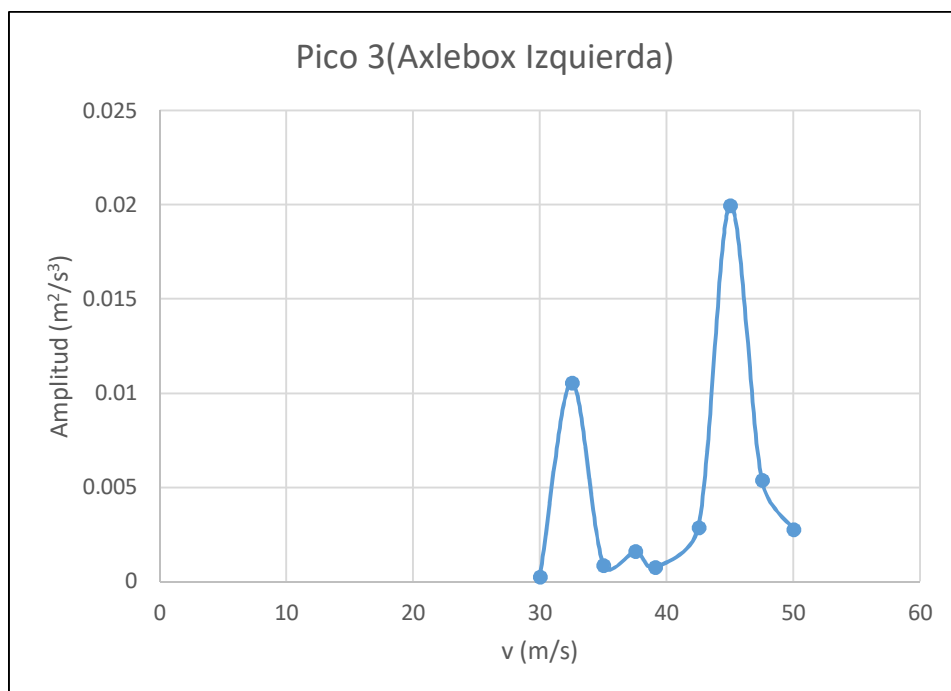
**Figura A.1** Valor del segundo armónico, WSet, primer experimento



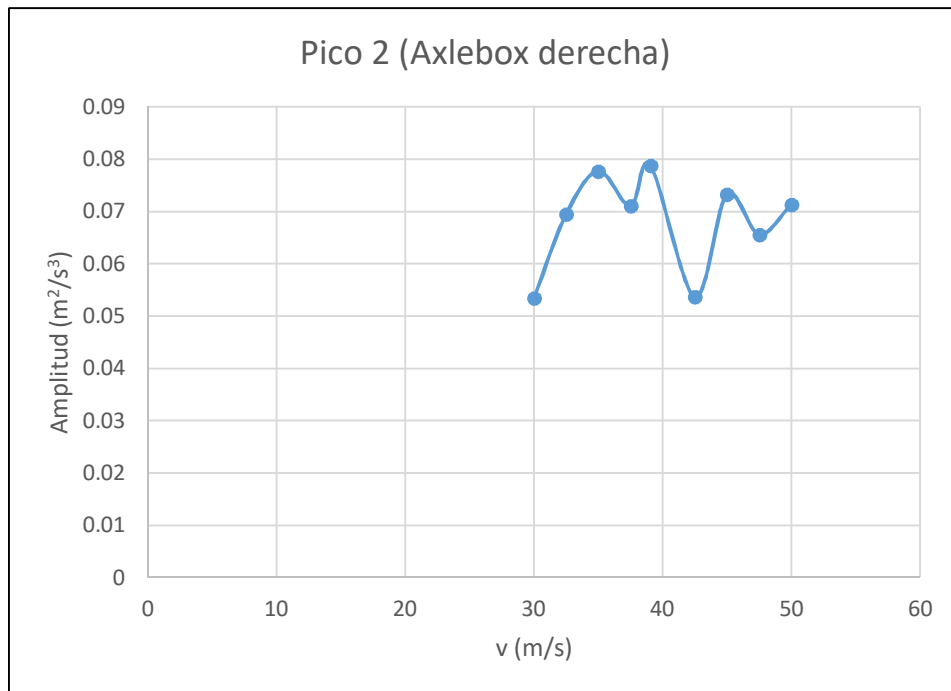
**Figura A.2** Valor del tercer armónico, WSet, primer experimento



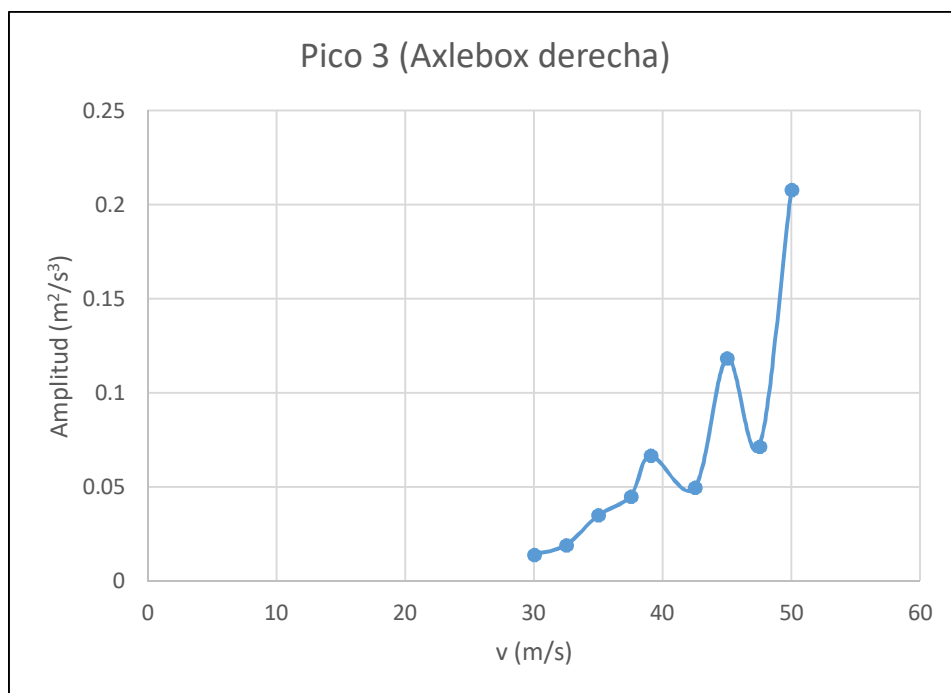
**Figura A.3** Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, primer experimento



**Figura A.4** Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda, primer experimento



**Figura A.5** Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, primer experimento



**Figura A.6** Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, primer experimento

## 8.2 Anexos del experimento con un modelo complejo

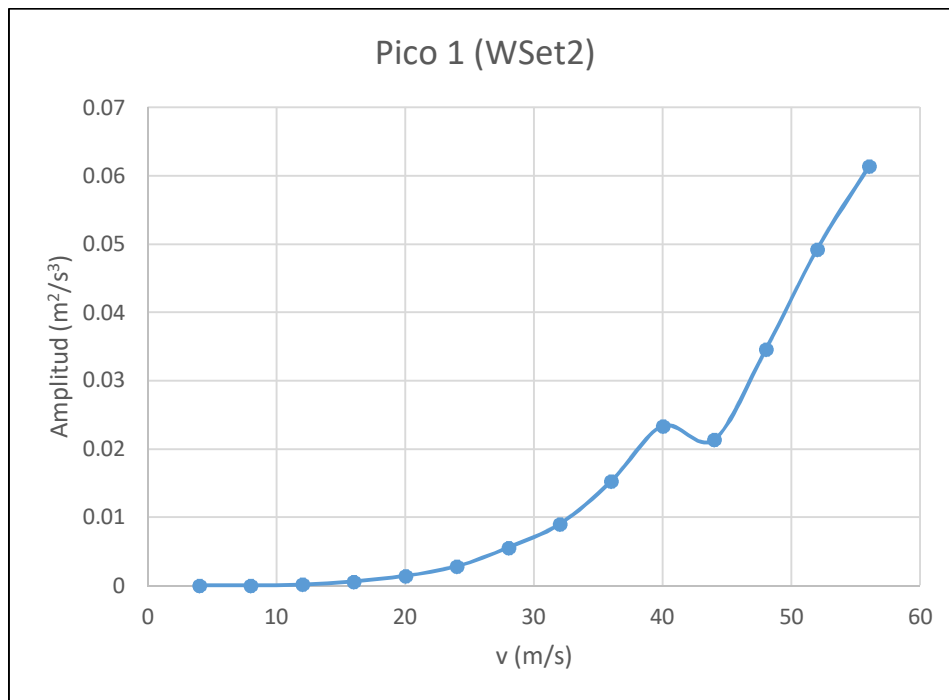


Figura A.7 Valor del primer armónico, WSet 2, segundo experimento

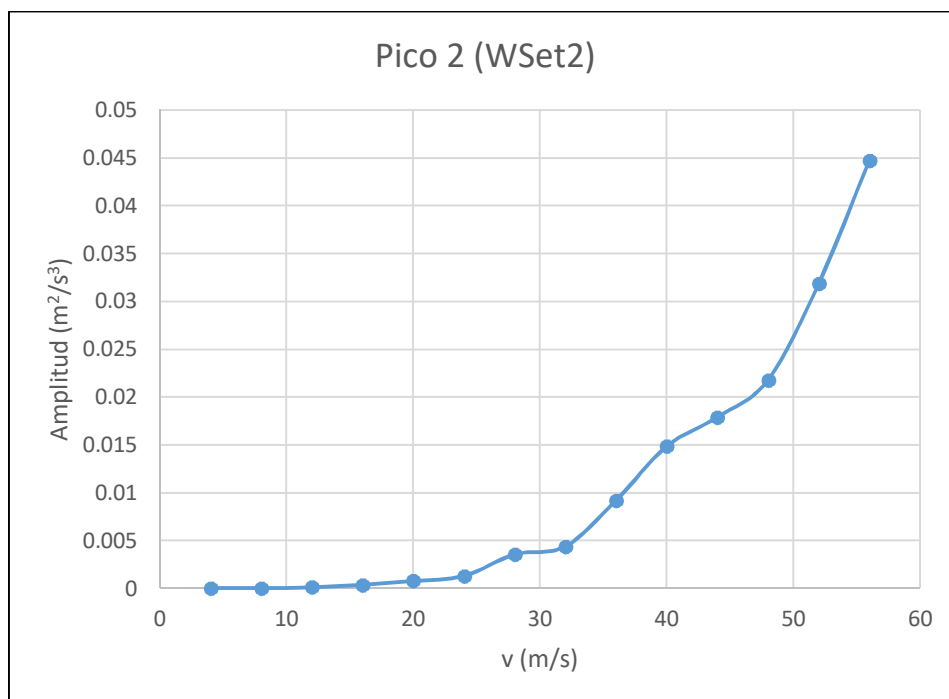
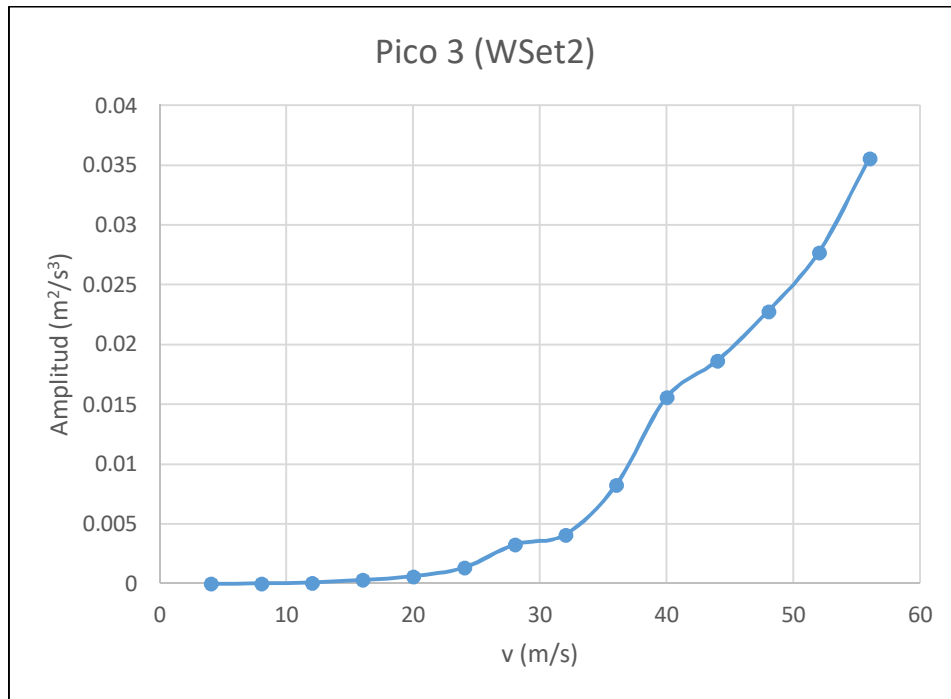
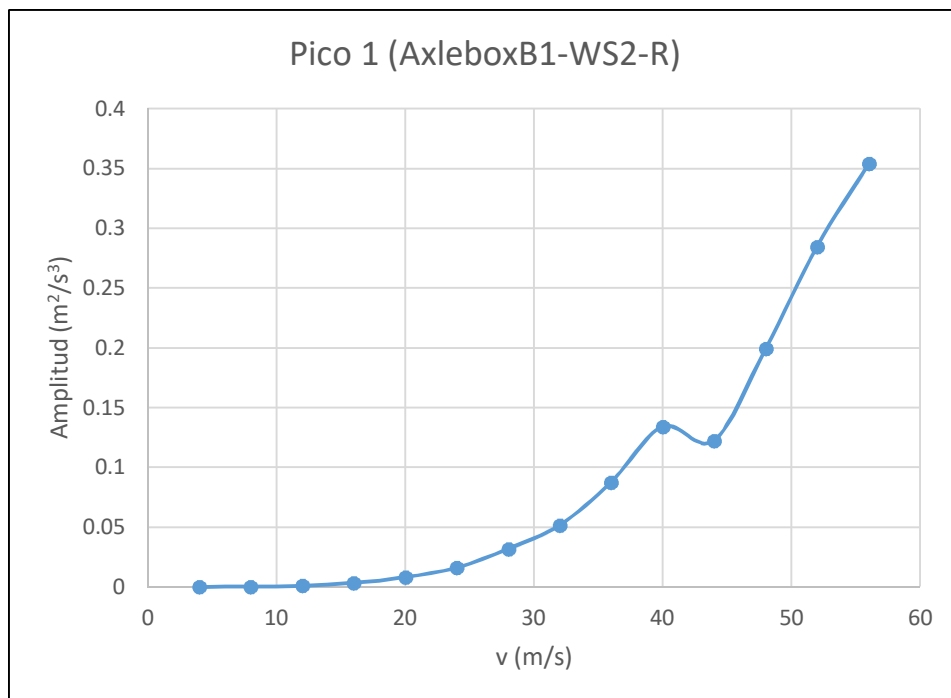


Figura A.8 Valor del segundo armónico, WSet2, segundo experimento

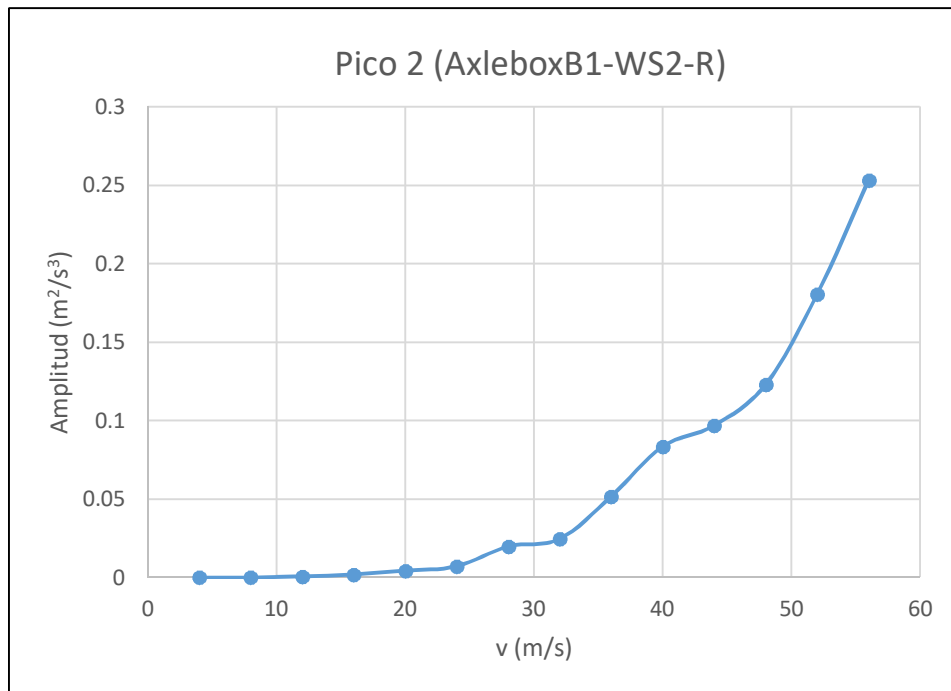


**Figura A.9** Valor del tercer armónico, WSet2, segundo experimento

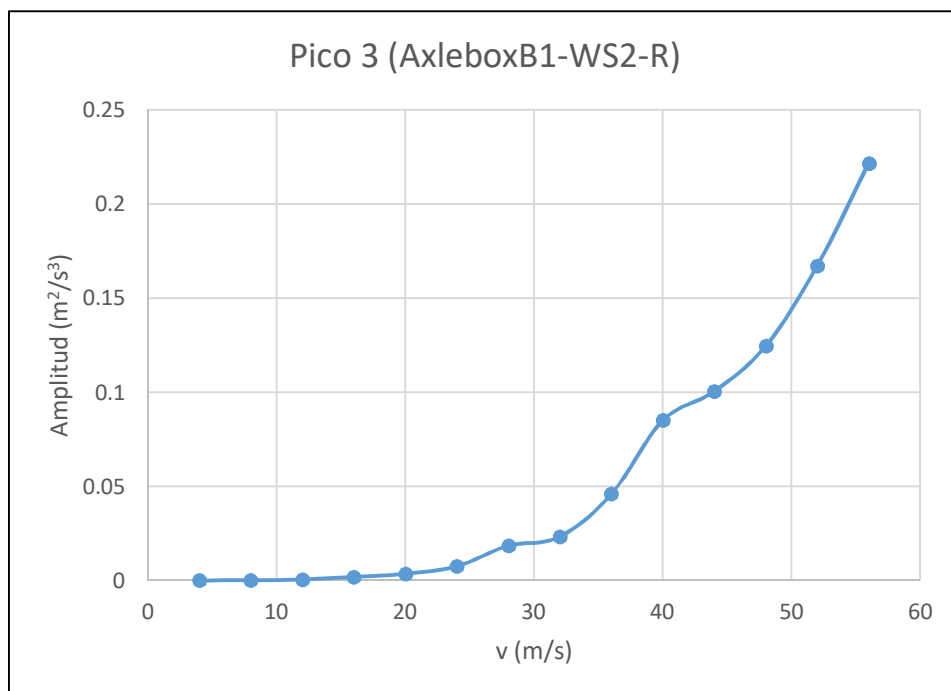


**Figura A.10** Valor del primer armónico, caja de grasas derecha, WSet2, segundo experimento

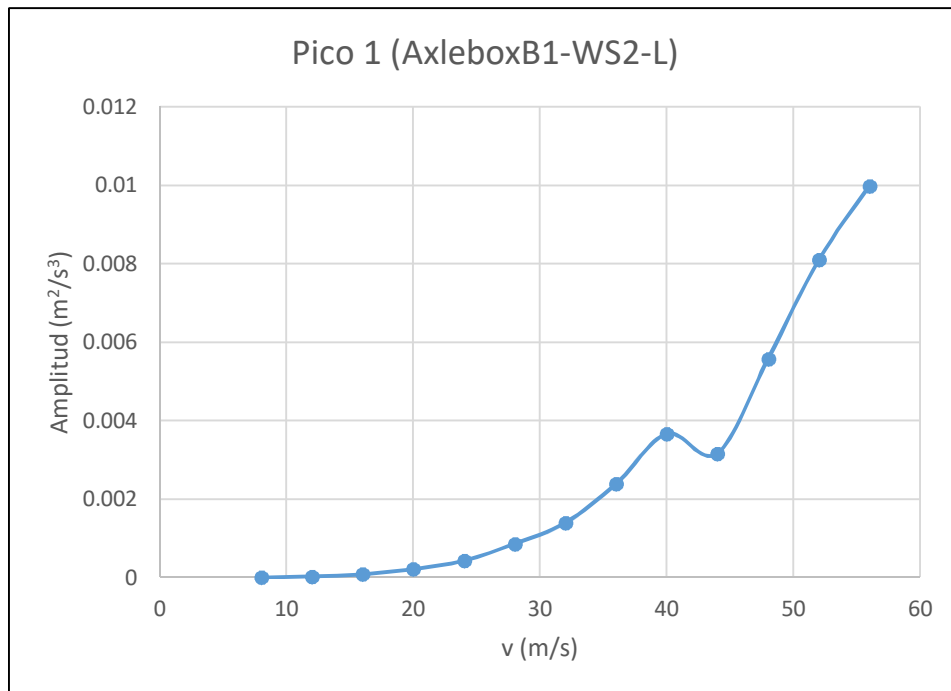




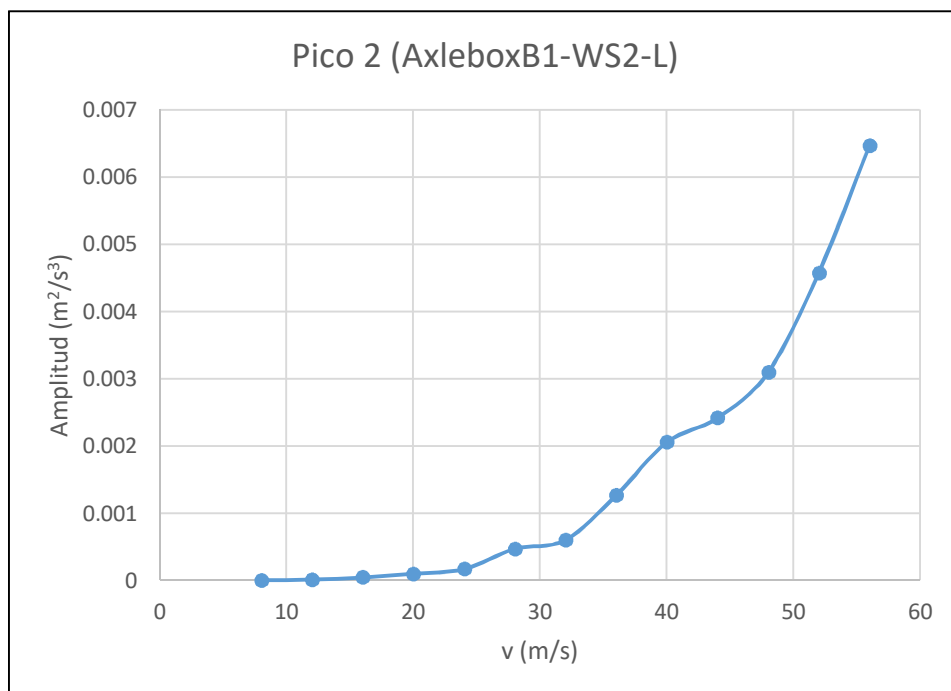
**Figura A.11** Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, WSet2, segundo experimento



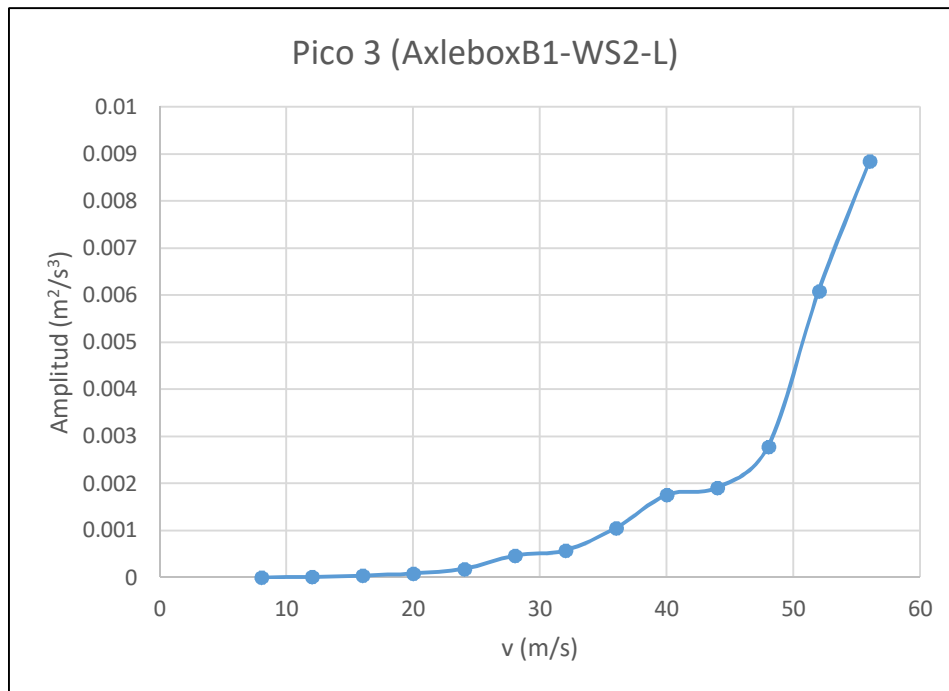
**Figura A.12** Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, WSet2, segundo experimento



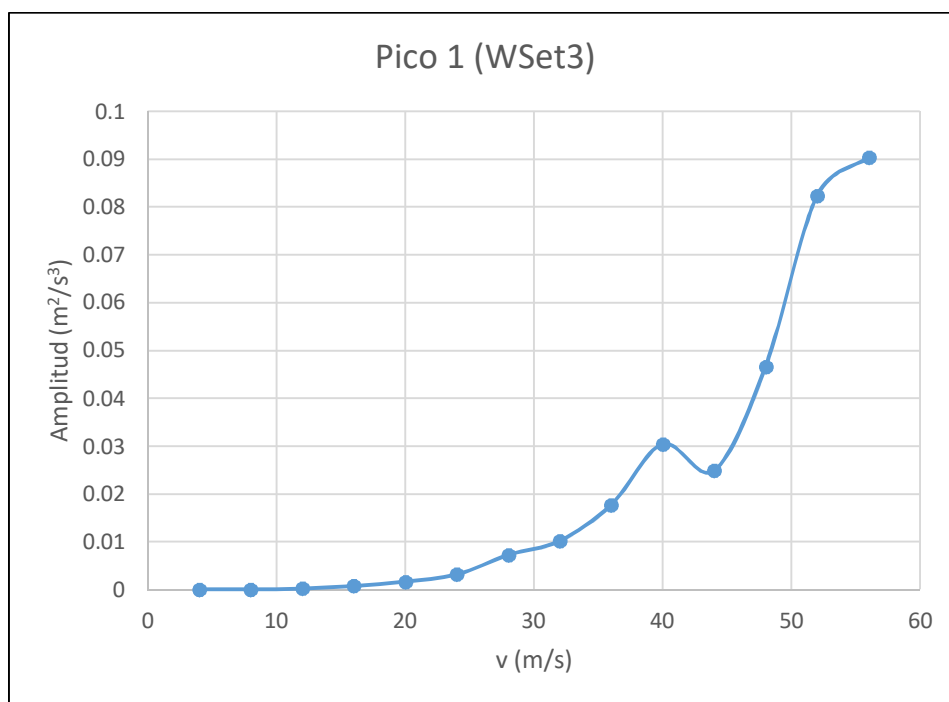
**Figura A.13** Valor del primer armónico, caja de grasas izquierda, WSet2, segundo experimento



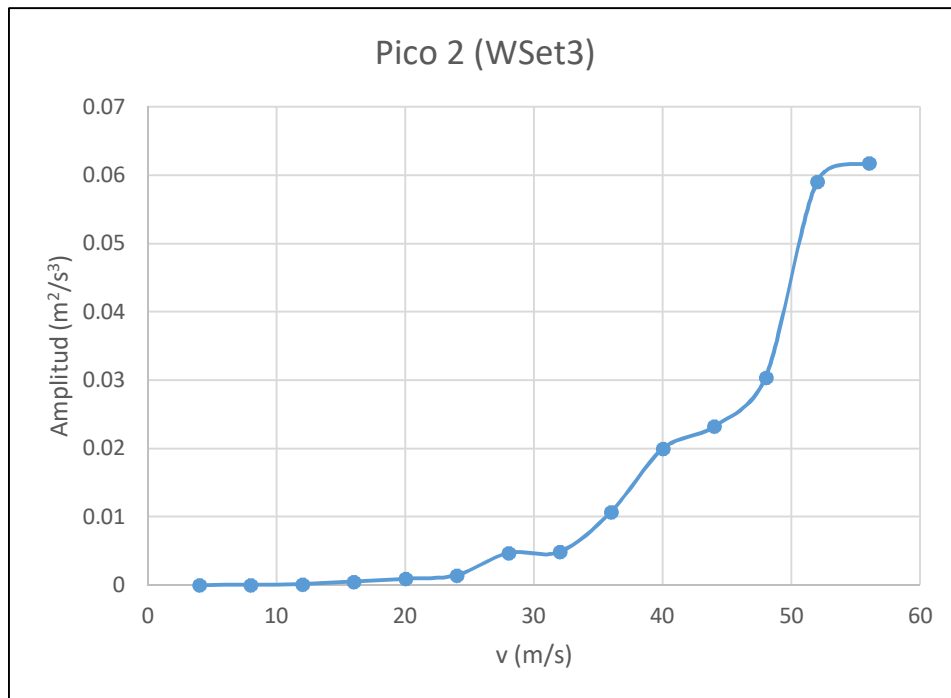
**Figura A.14** Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, WSet 2, segundo experimento



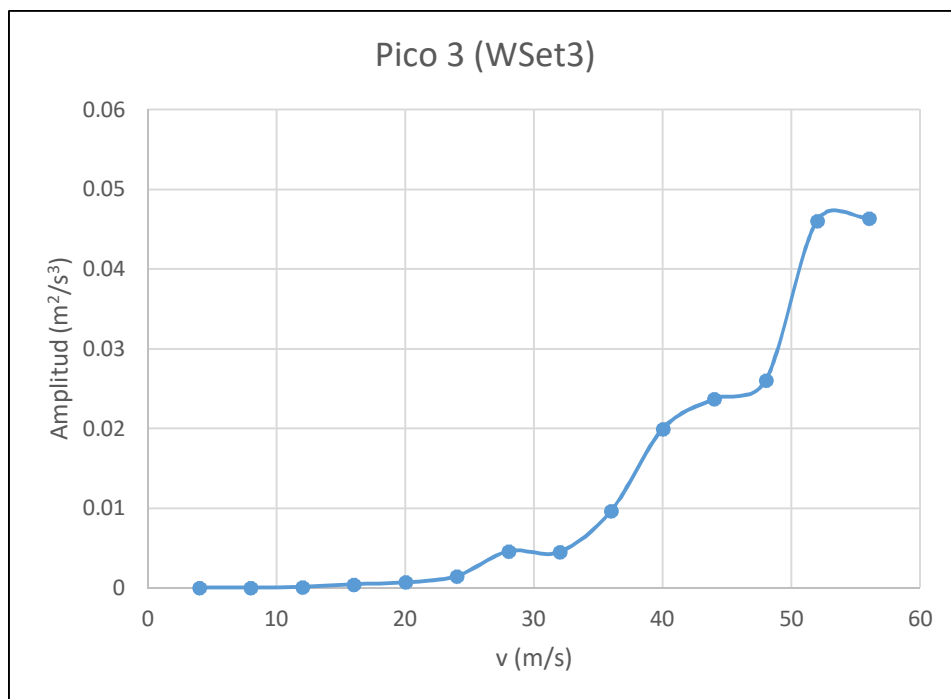
**Figura A.15** Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda, WSet2, segundo experimento



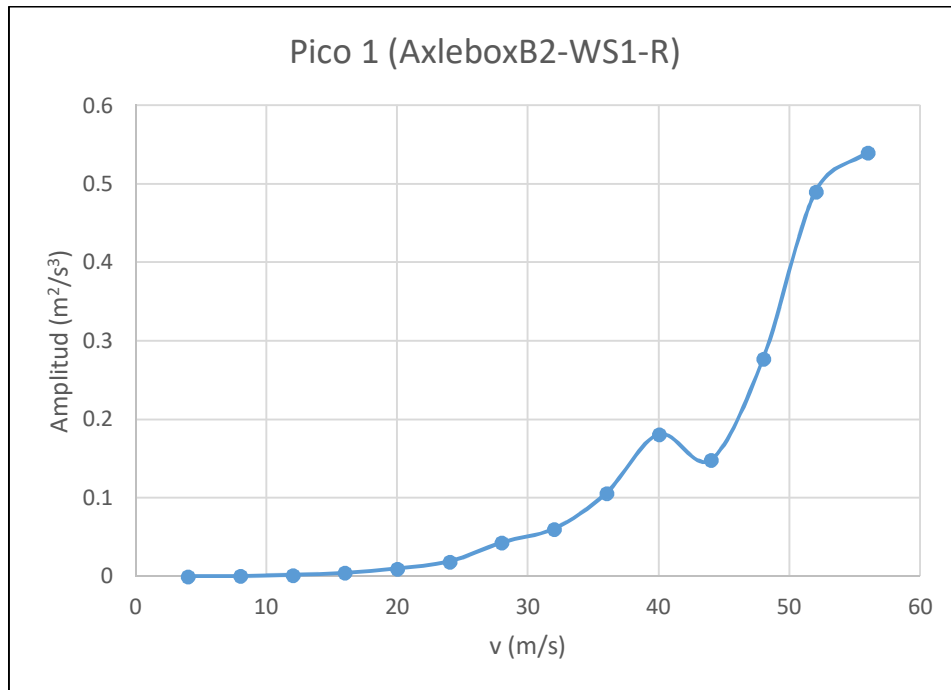
**Figura A.16** Valor del primer armónico, WSet 3, segundo experimento



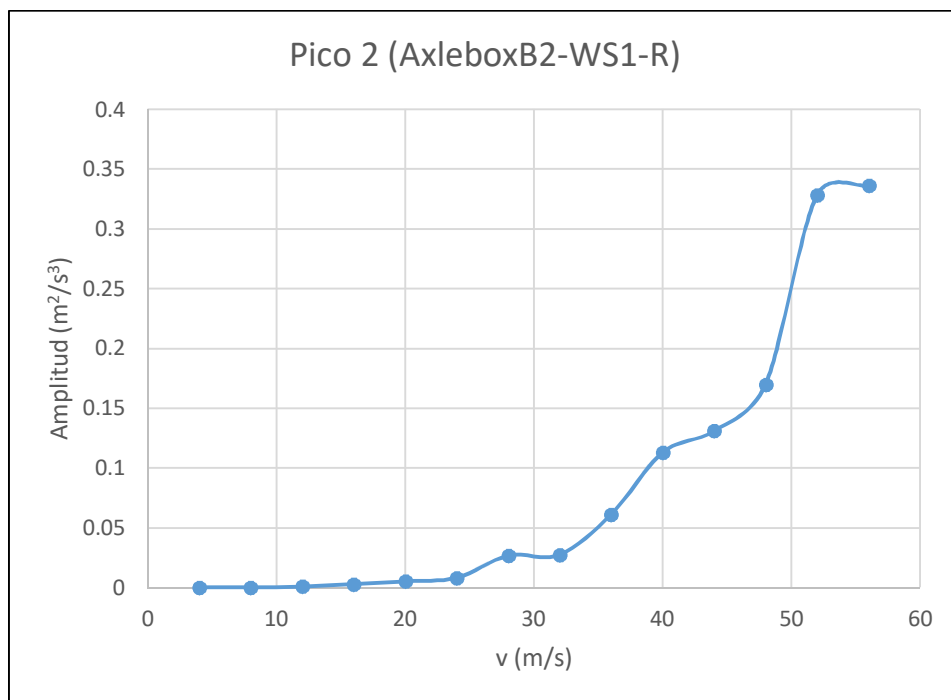
**Figura A.17** Valor del segundo armónico, WSet3, segundo experimento



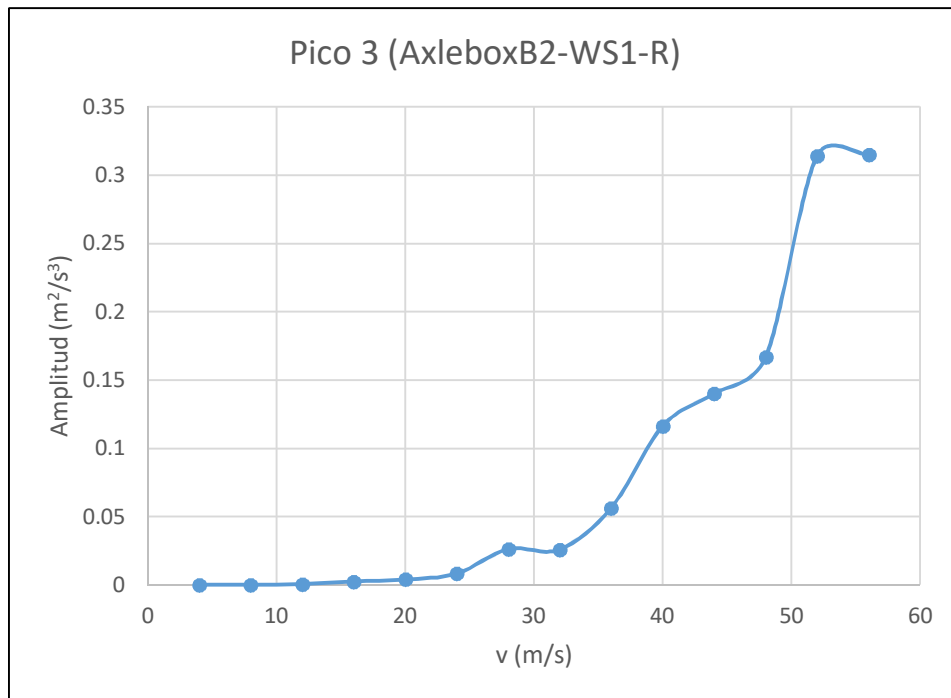
**Figura A.18** Valor del tercer armónico, WSet3, segundo experimento



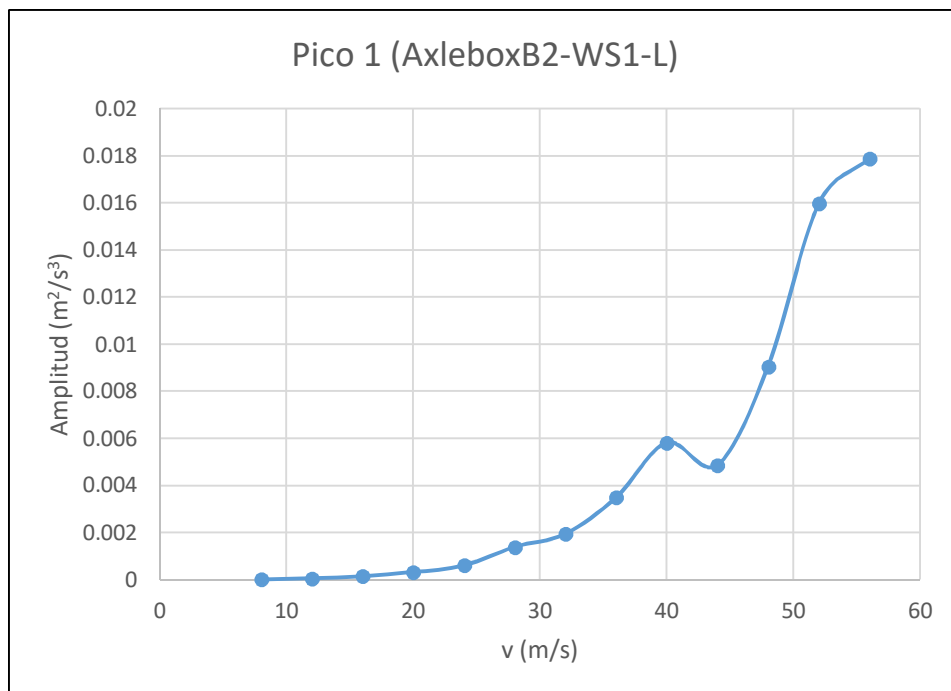
**Figura A.19** Valor del primer armónico, caja de grasas derecha, WSet3, segundo experimento



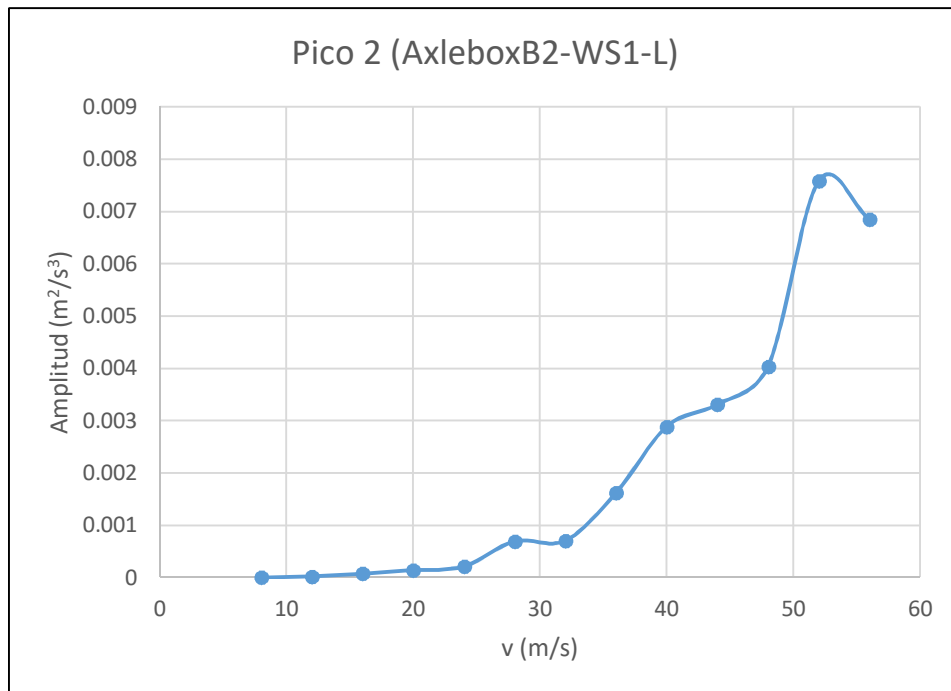
**Figura A.20** Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, WSet3, segundo experimento



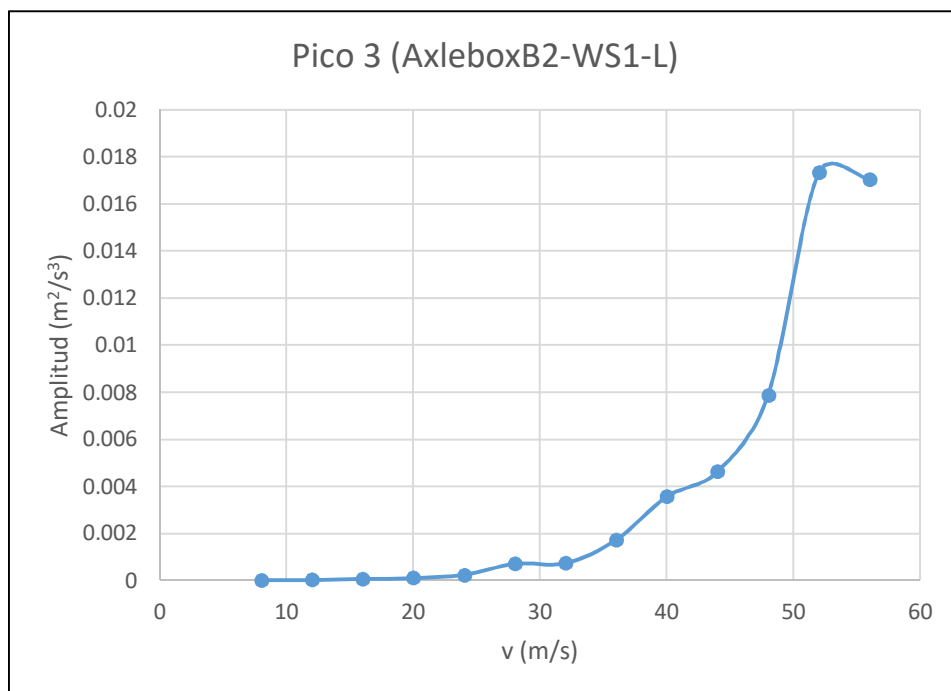
**Figura A.21** Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, WSet3, segundo experimento



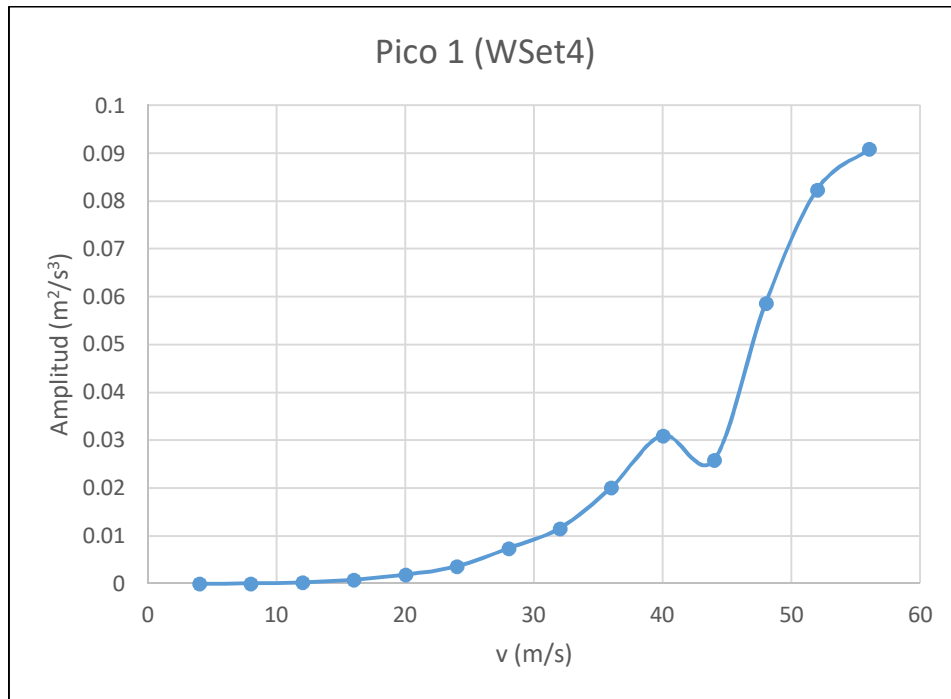
**Figura A.22** Valor del primer armónico, caja de grasas izquierda, WSet3, segundo experimento



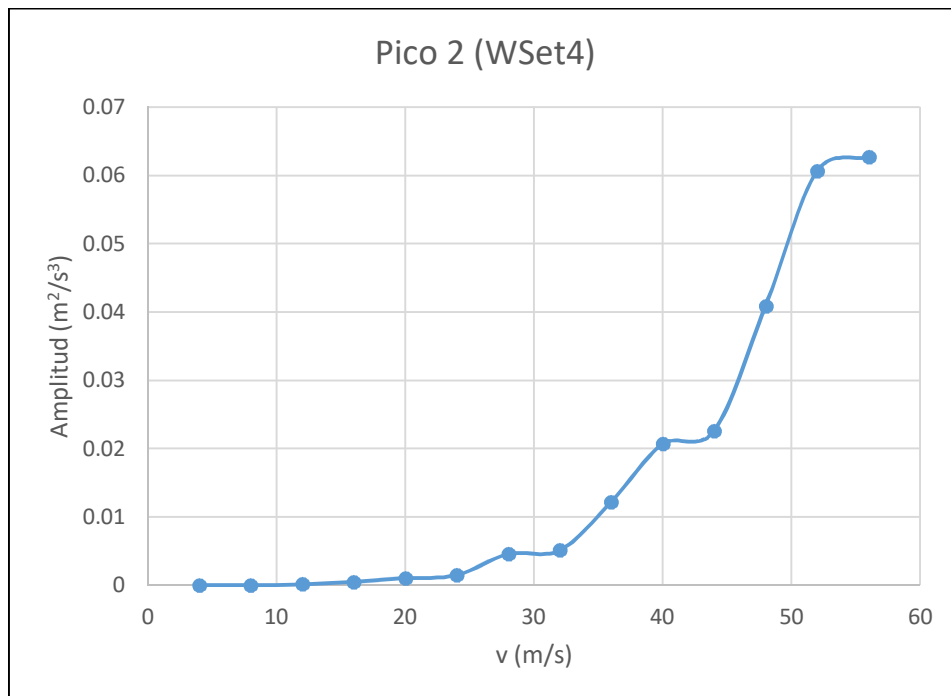
**Figura A.23** Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, WSet 3, segundo experimento



**Figura A.24** Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda WSet 3, segundo experimento

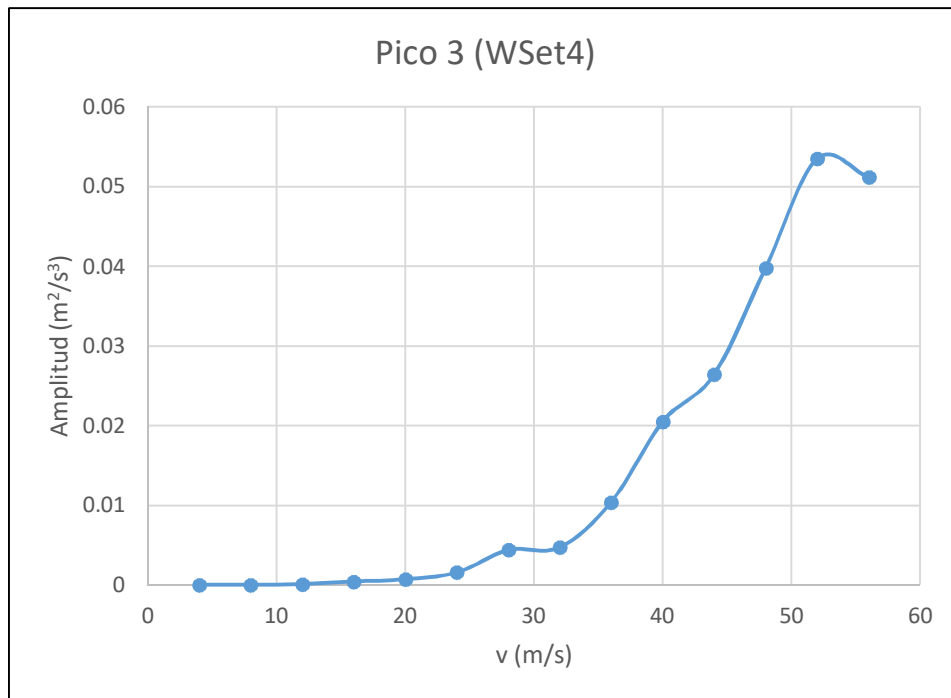


**Figura A.25** Valor del primer armónico, WSet4, segundo experimento

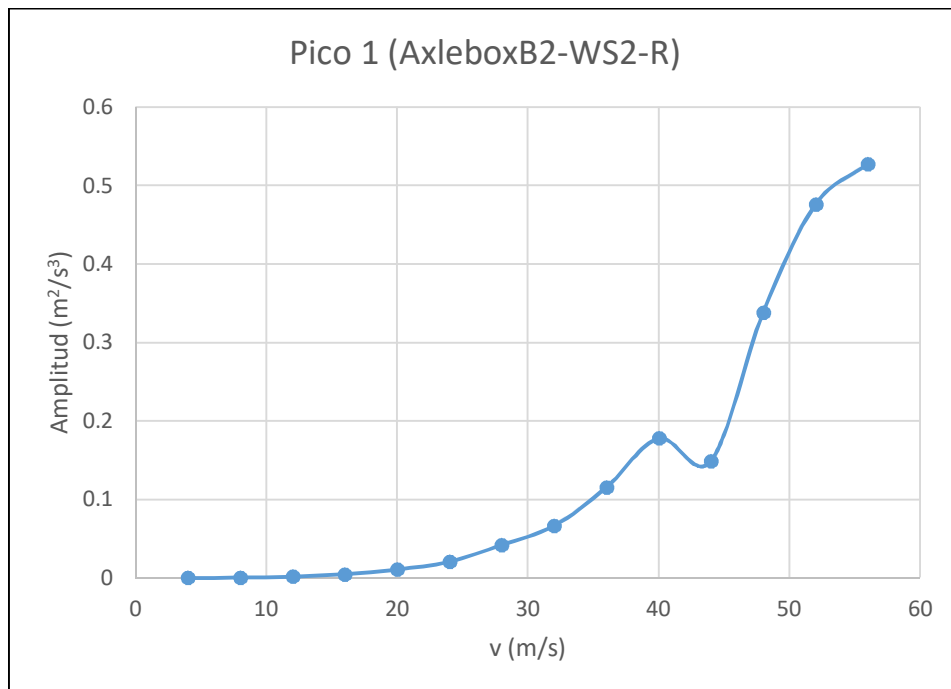


**Figura A.26** Valor del segundo armónico, WSet4, segundo experimento

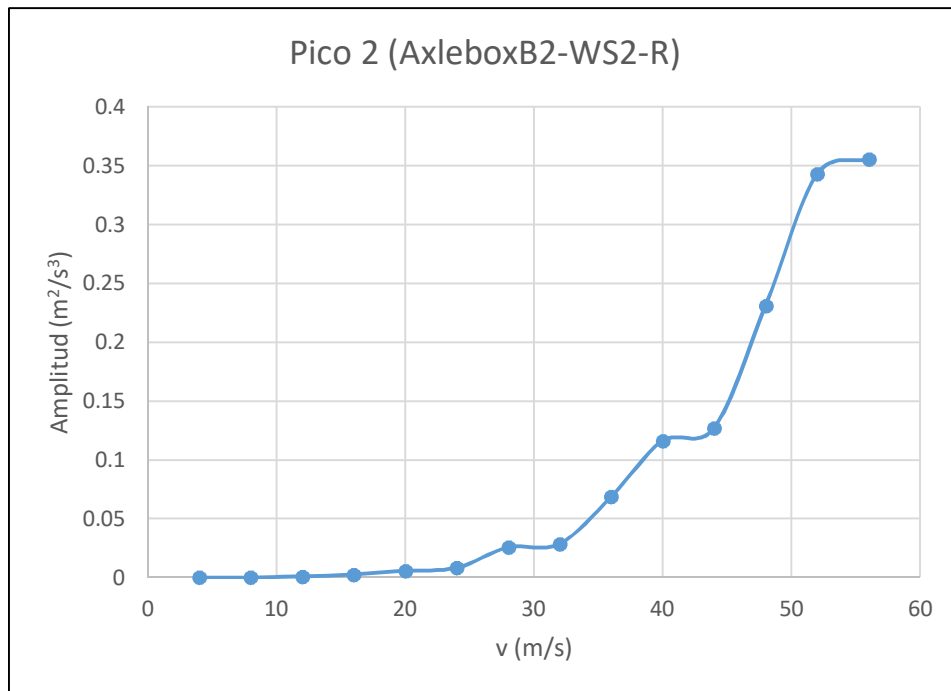




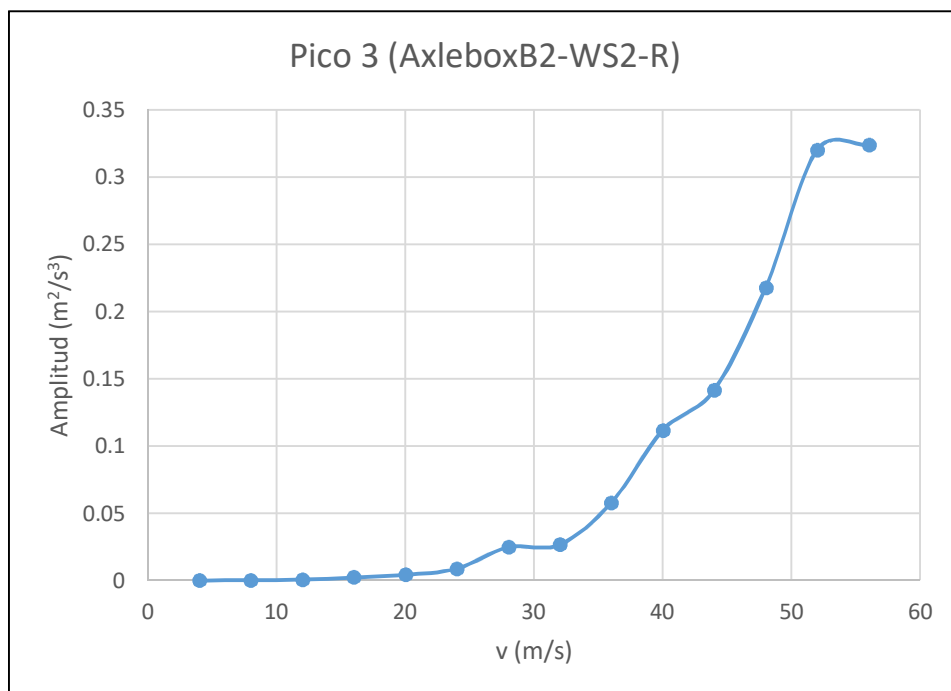
**Figura A.27** Valor del tercer armónico, WSet4, segundo experimento



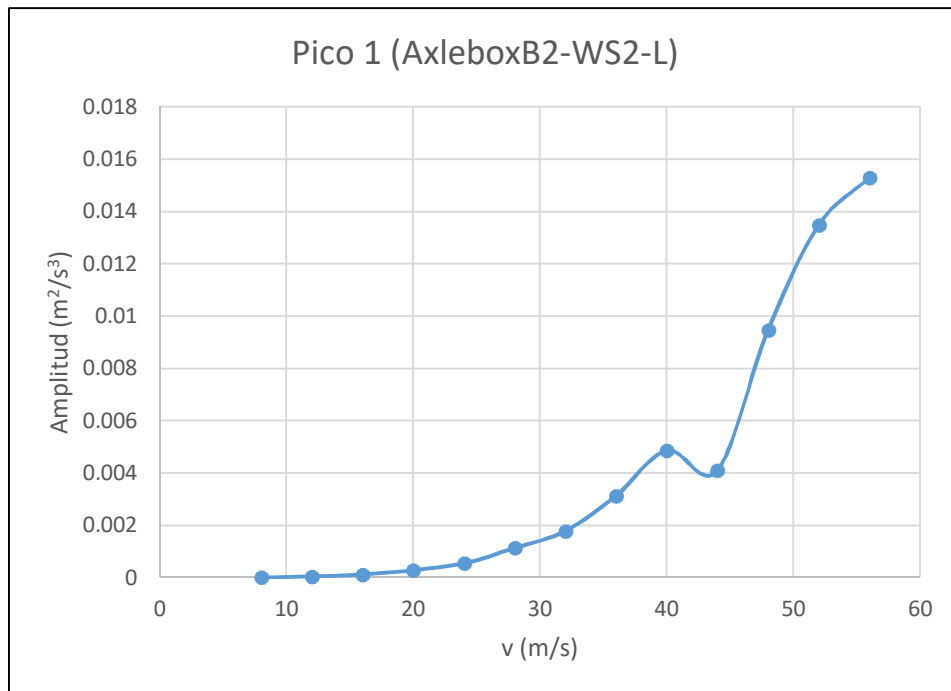
**Figura A.28** Valor del primer armónico, caja de grasas derecha, WSet4, segundo experimento



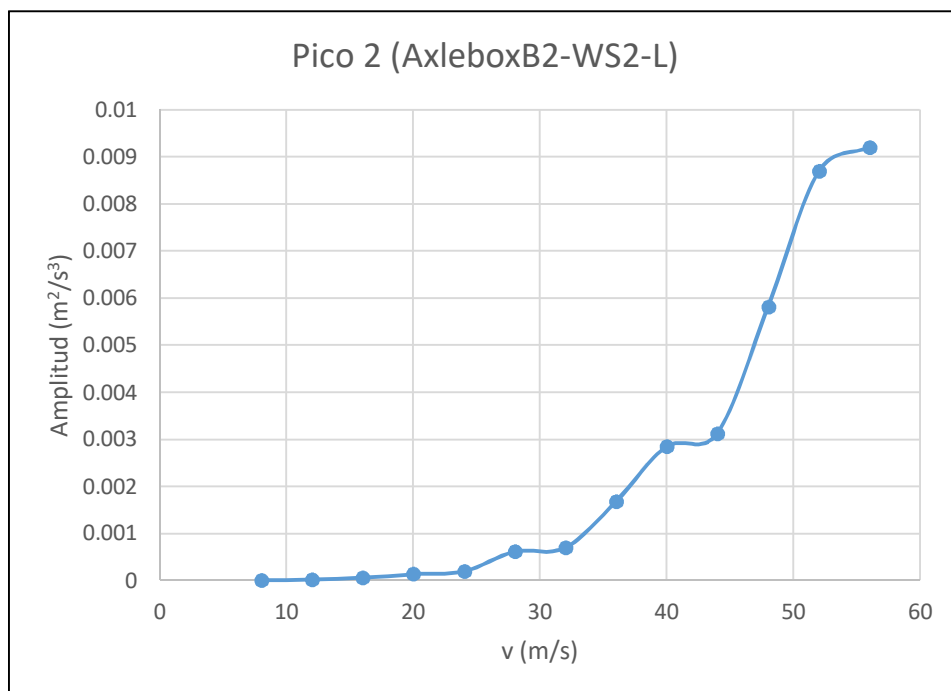
**Figura A.29** Valor del segundo armónico, caja de grasas derecha, WSet4, segundo experimento



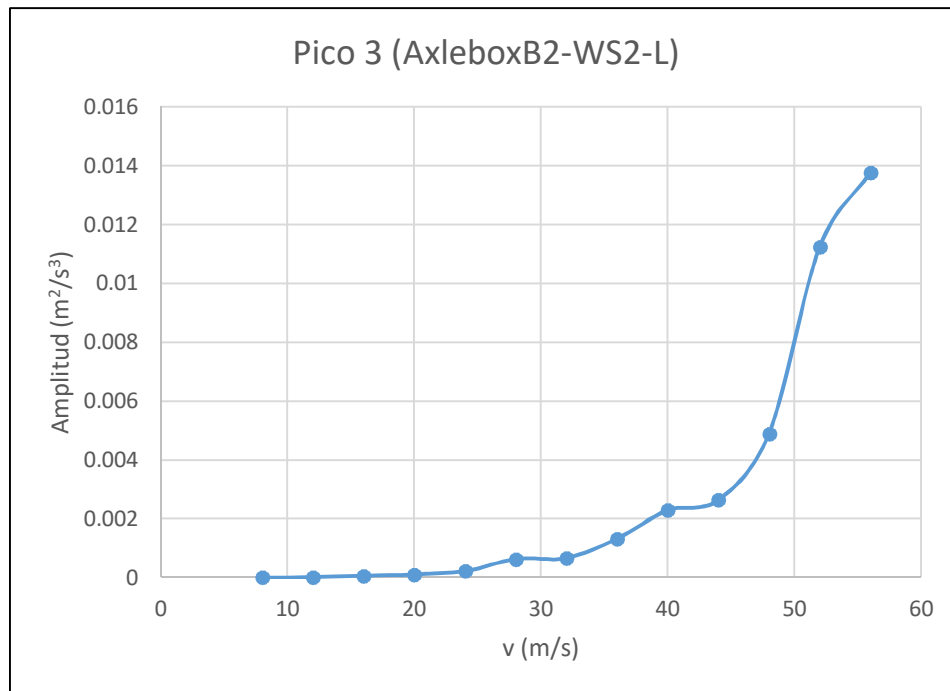
**Figura A.30** Valor del tercer armónico, caja de grasas derecha, WSet4, segundo experimento



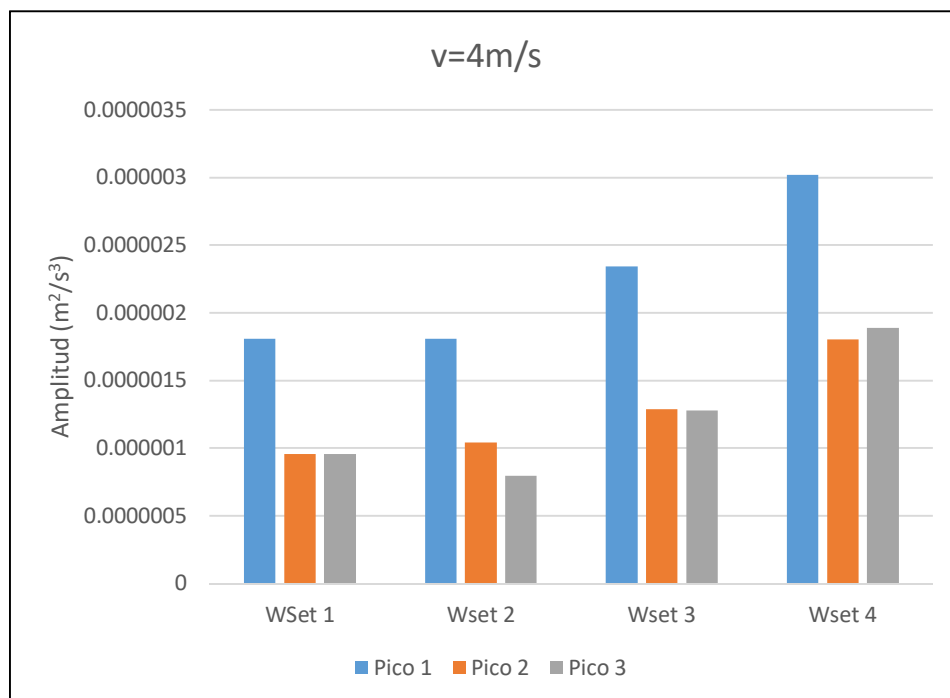
**Figura A.31** Valor del primer armónico, caja de grasas izquierda, WSet4, segundo experimento



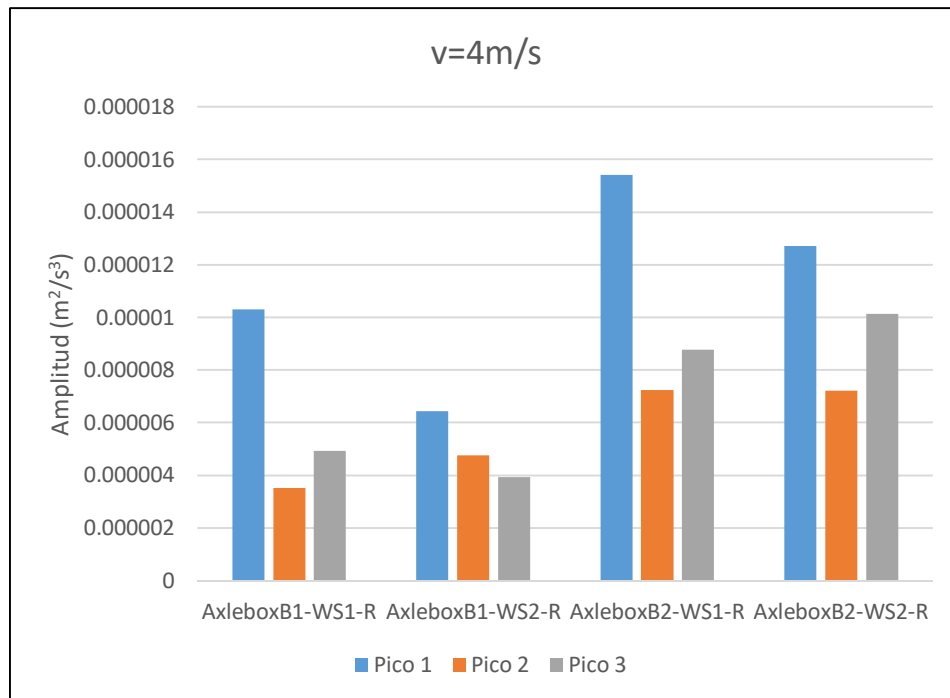
**Figura A.32** Valor del segundo armónico, caja de grasas izquierda, WSet 4, segundo experimento



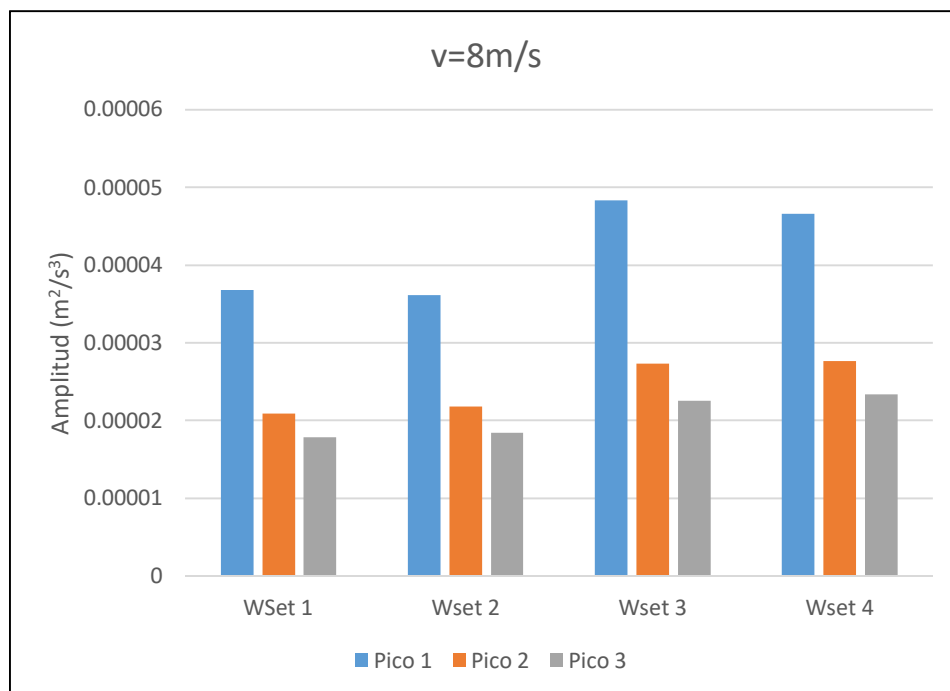
**Figura A.33** Valor del tercer armónico, caja de grasas izquierda WSet 4, segundo experimento



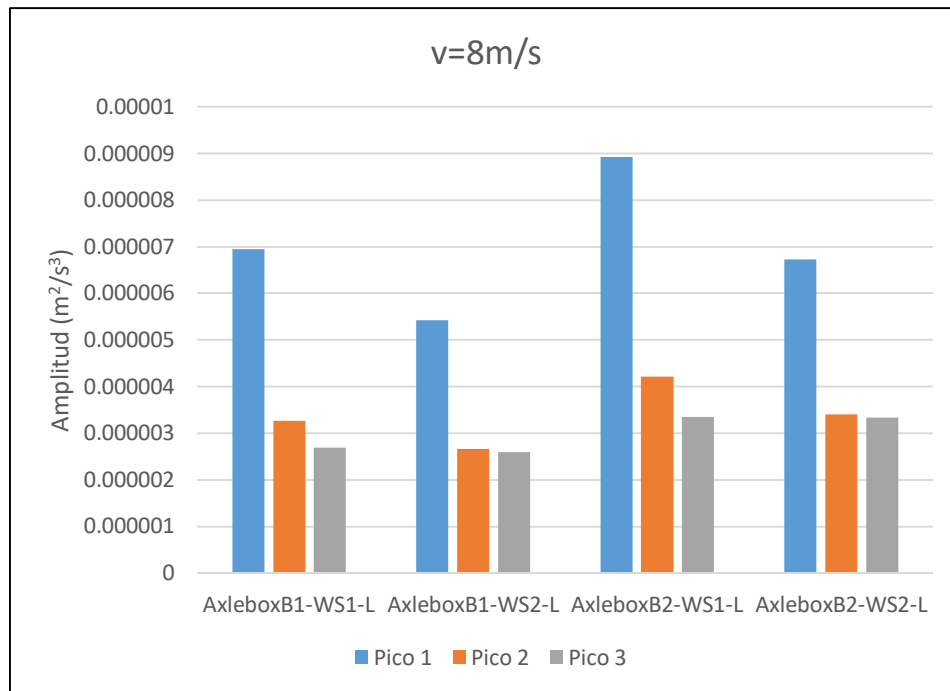
**Figura A.34** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 4m/s



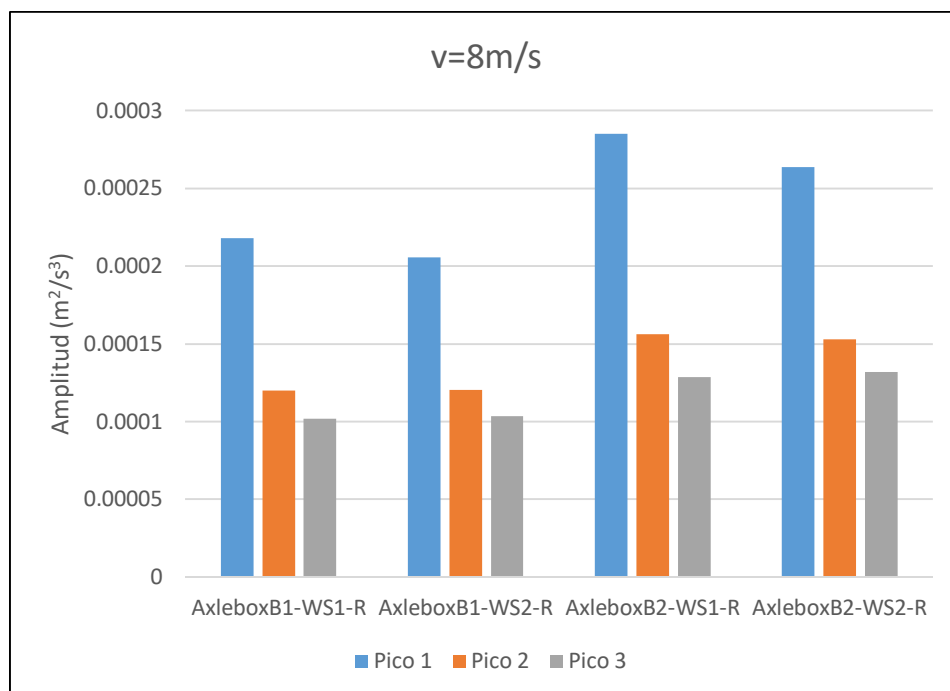
**Figura A.35** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 4 m/s



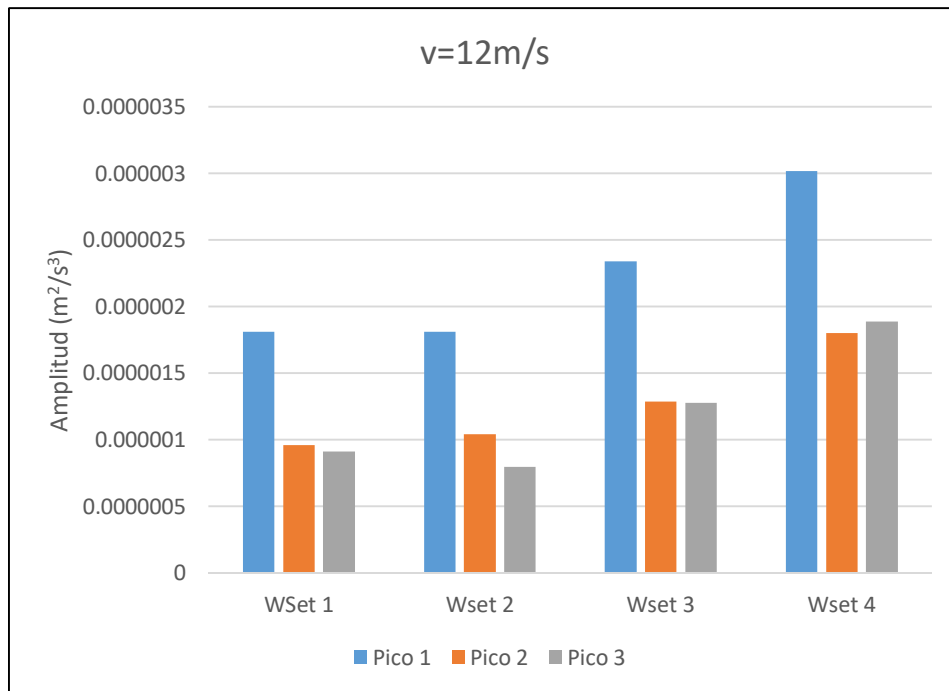
**Figura A.36** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 8m/s



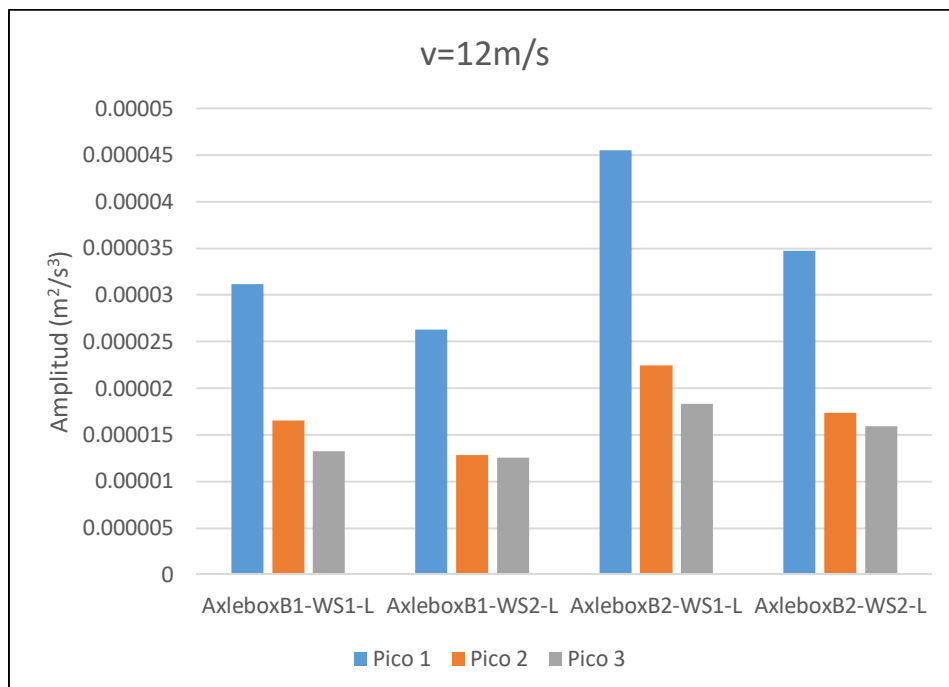
**Figura A.37** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 8 m/s



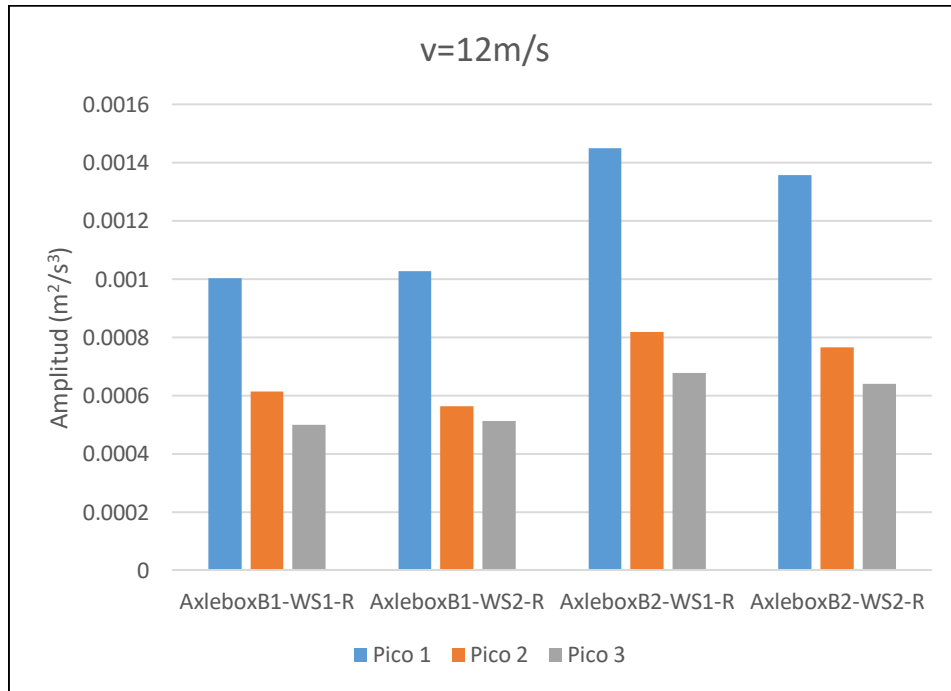
**Figura A.38** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 8 m/s



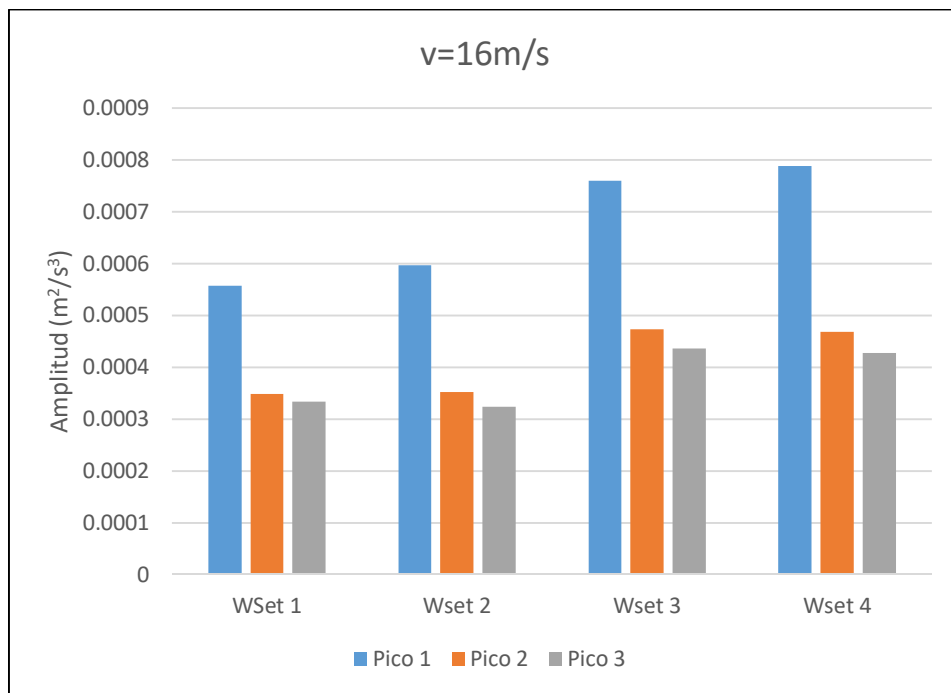
**Figura A.39** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 12m/s



**Figura A.40** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 12 m/s

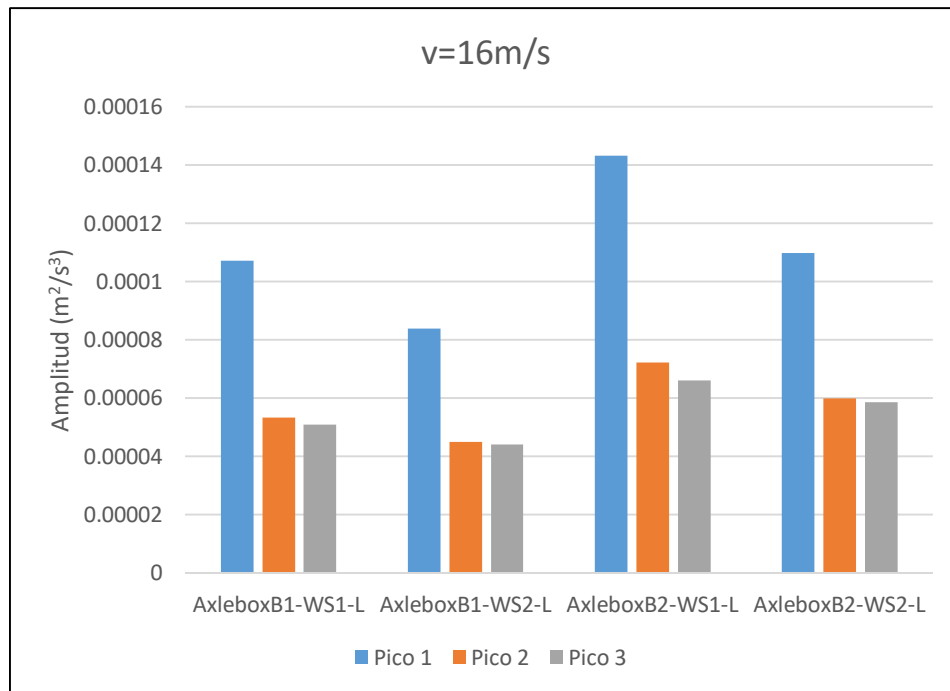


**Figura A.41** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 12 m/s

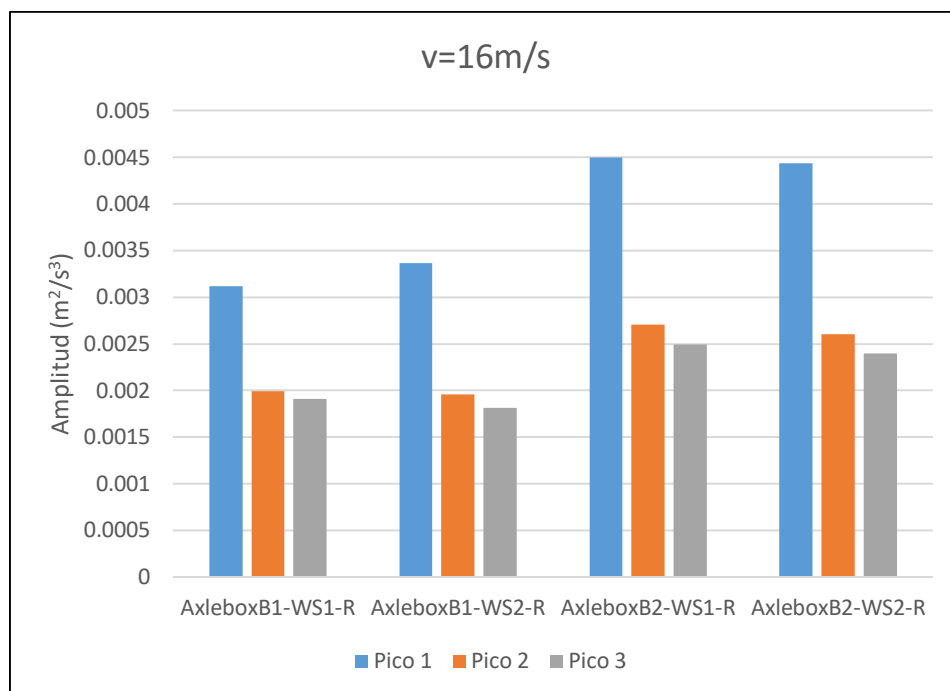


**Figura A.42** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 16 m/s

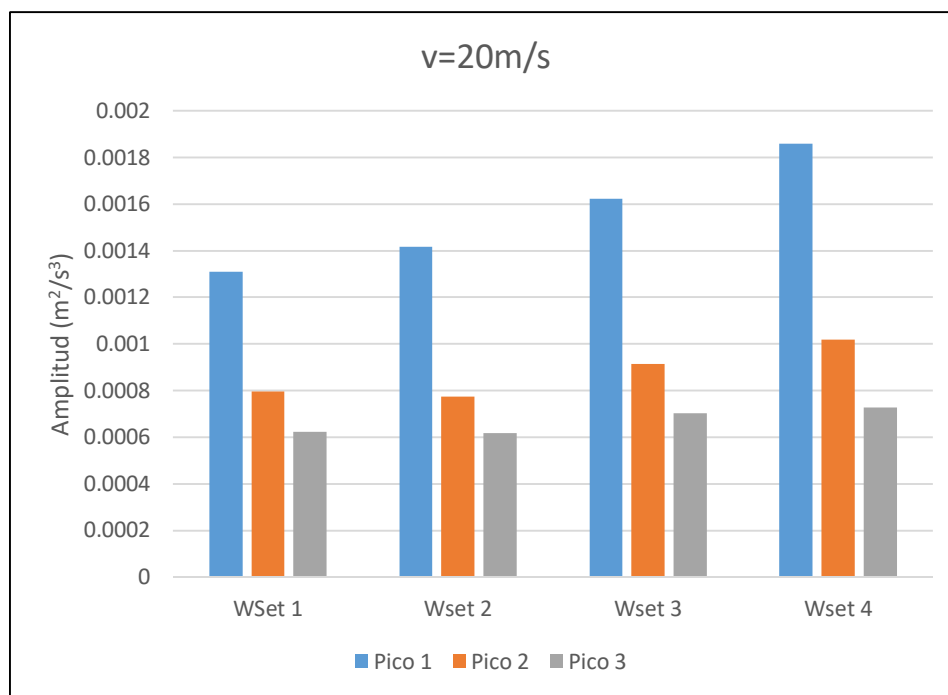




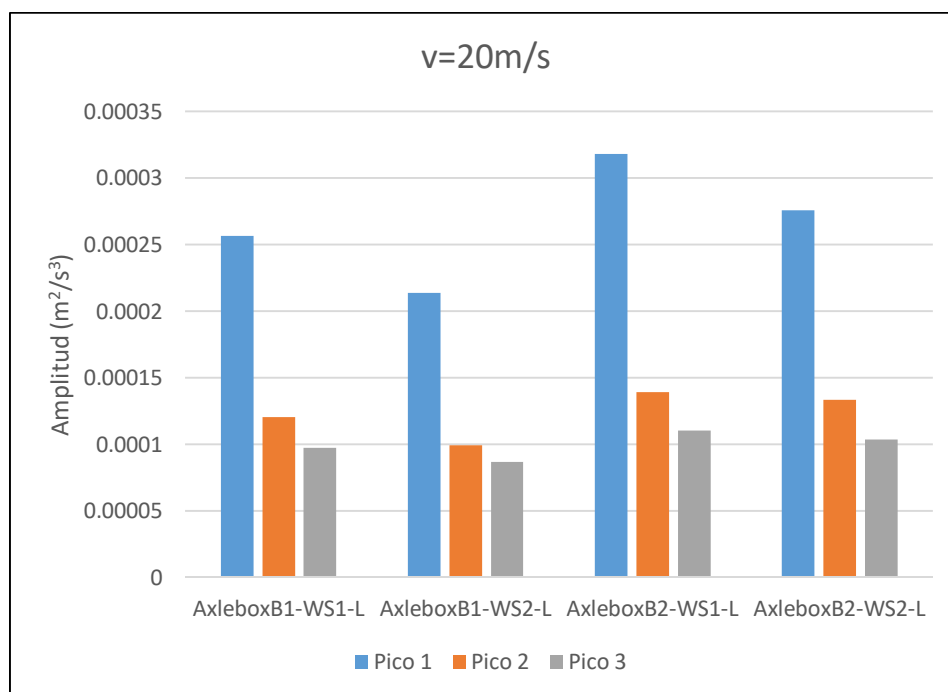
**Figura A.43** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 16 m/s



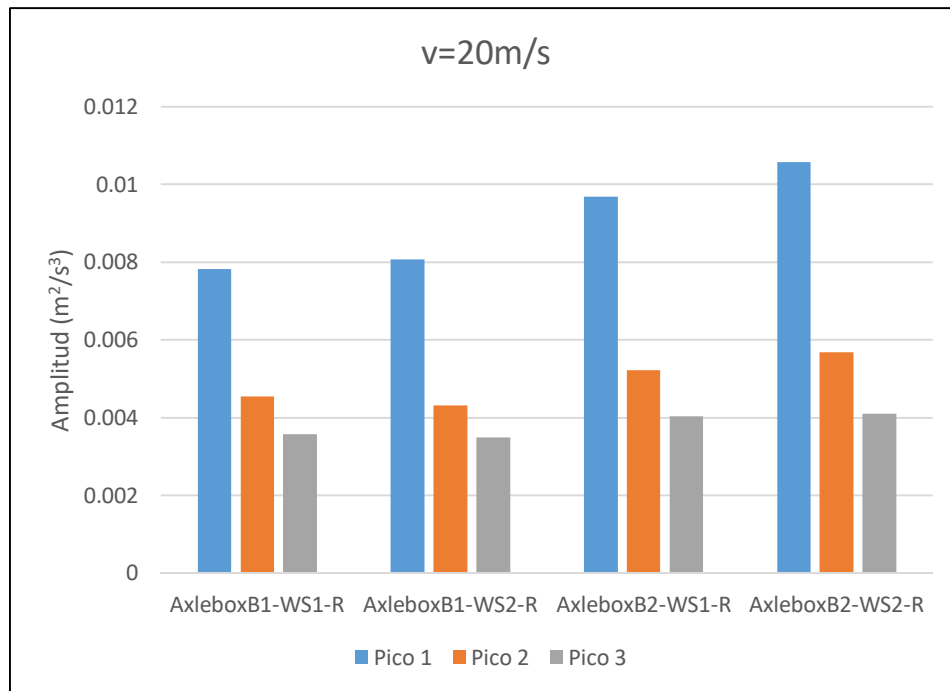
**Figura A.44** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 16 m/s



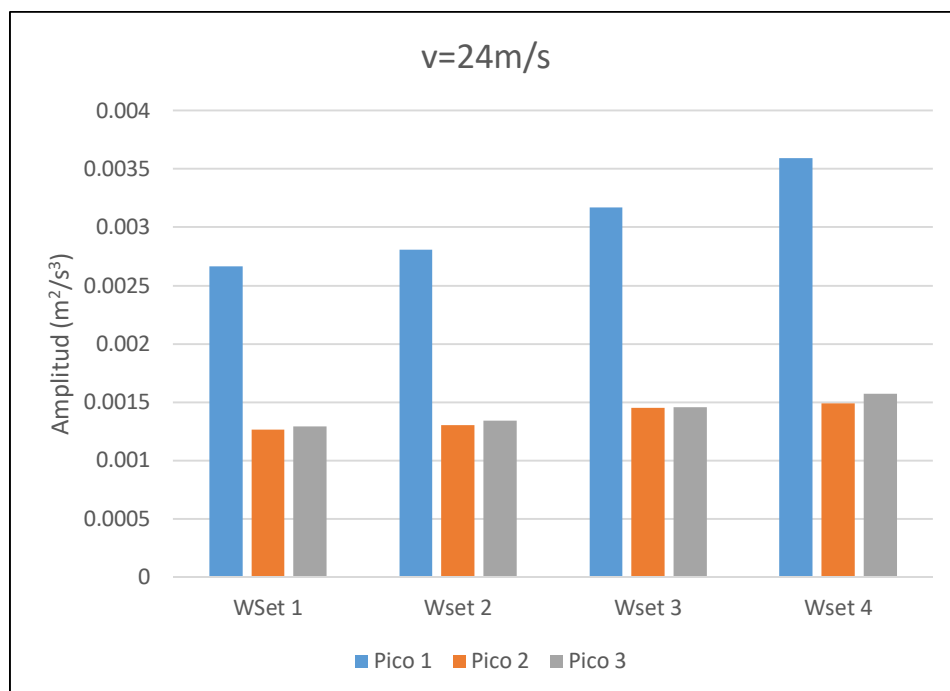
**Figura A.45** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 20 m/s



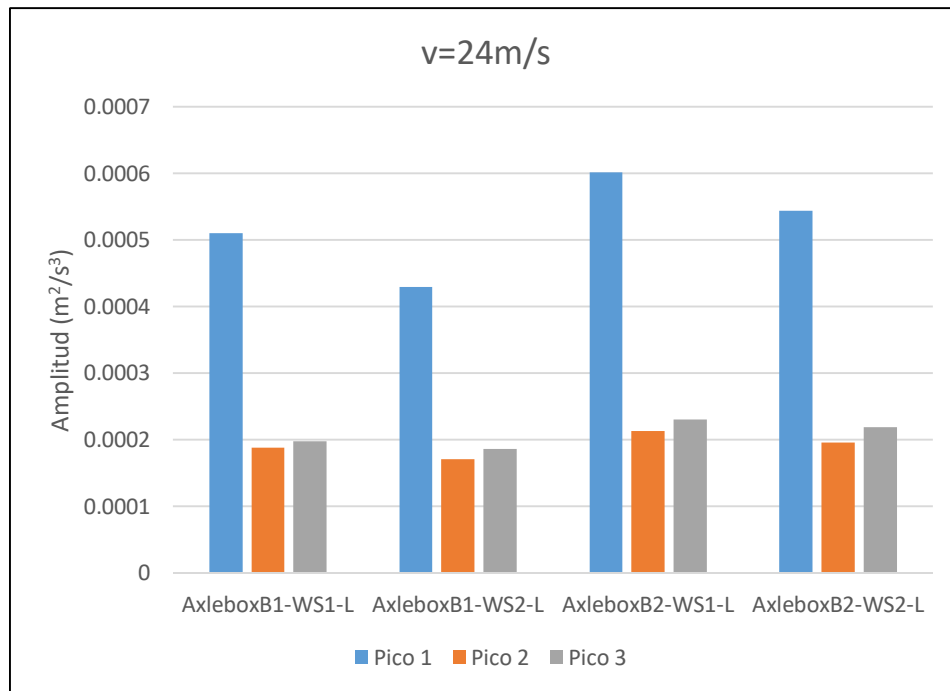
**Figura A.46** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 20 m/s



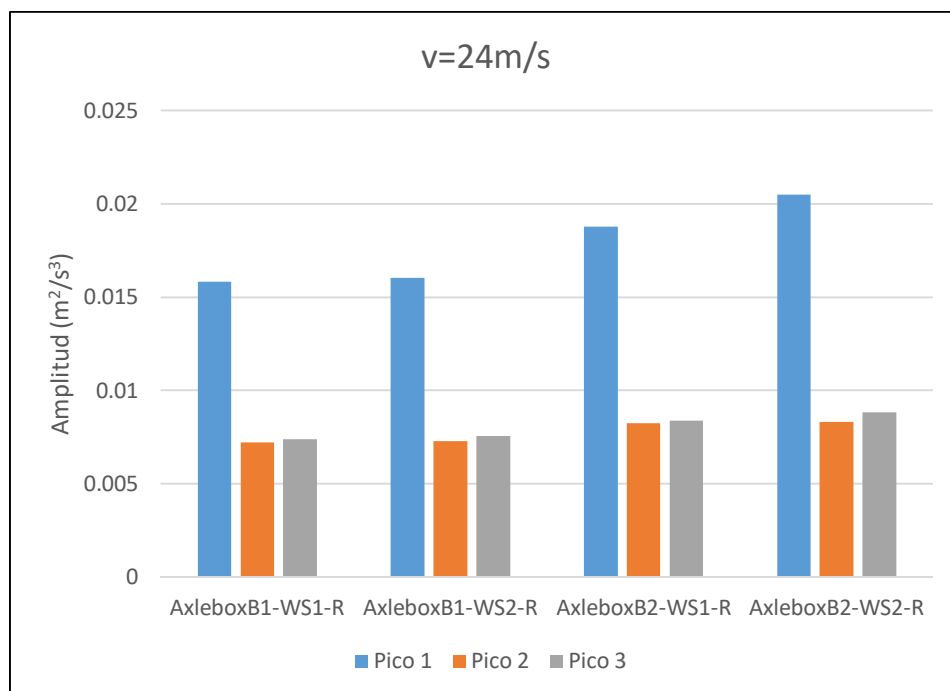
**Figura A.47** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 20 m/s



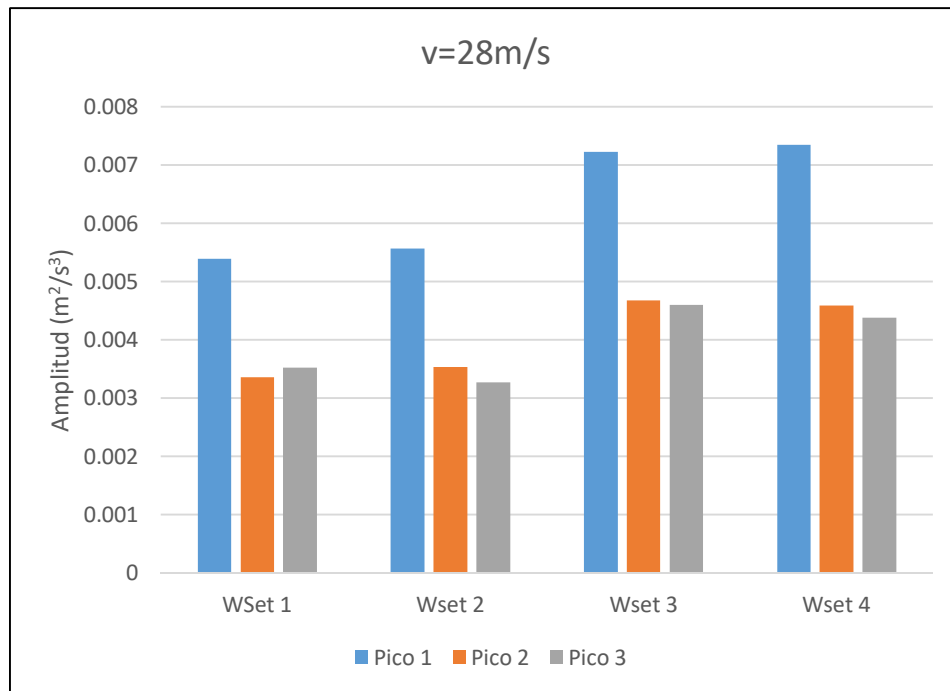
**Figura A.48** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 24 m/s



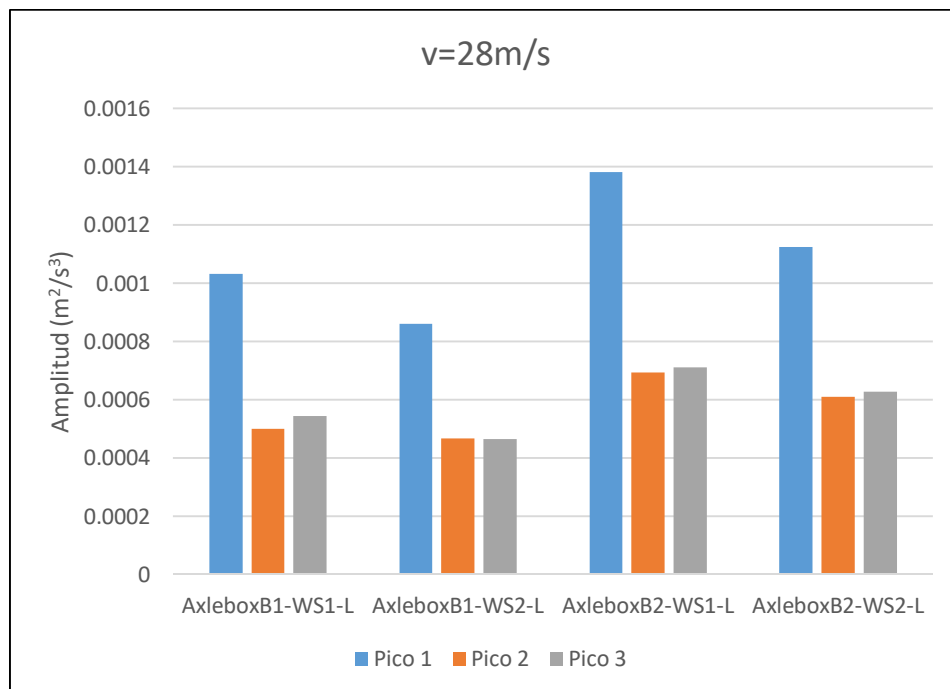
**Figura A.49** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 24 m/s



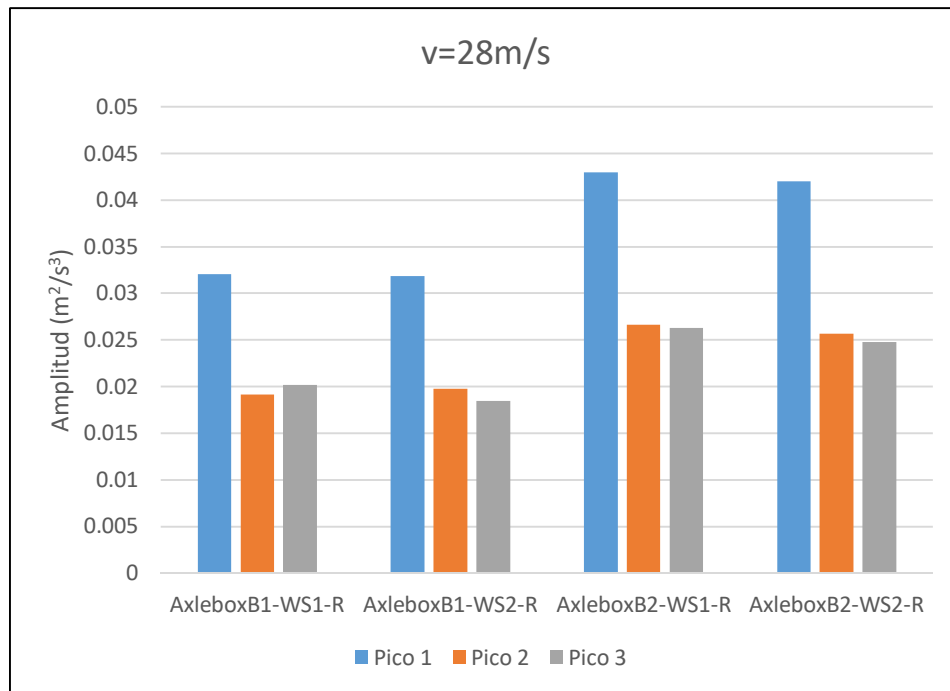
**Figura A.50** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 24 m/s



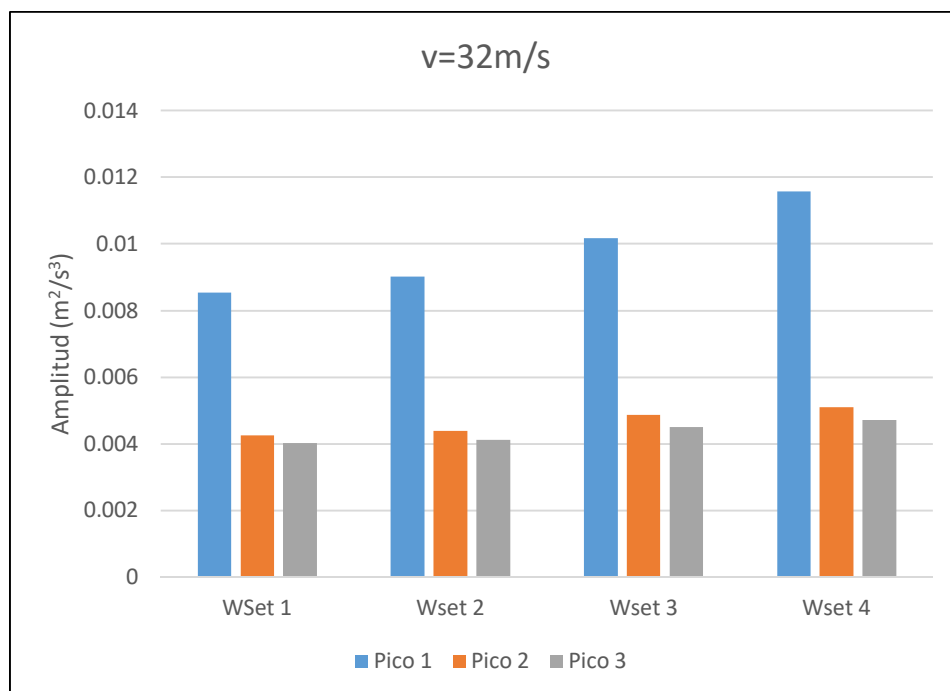
**Figura A.51** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 28 m/s



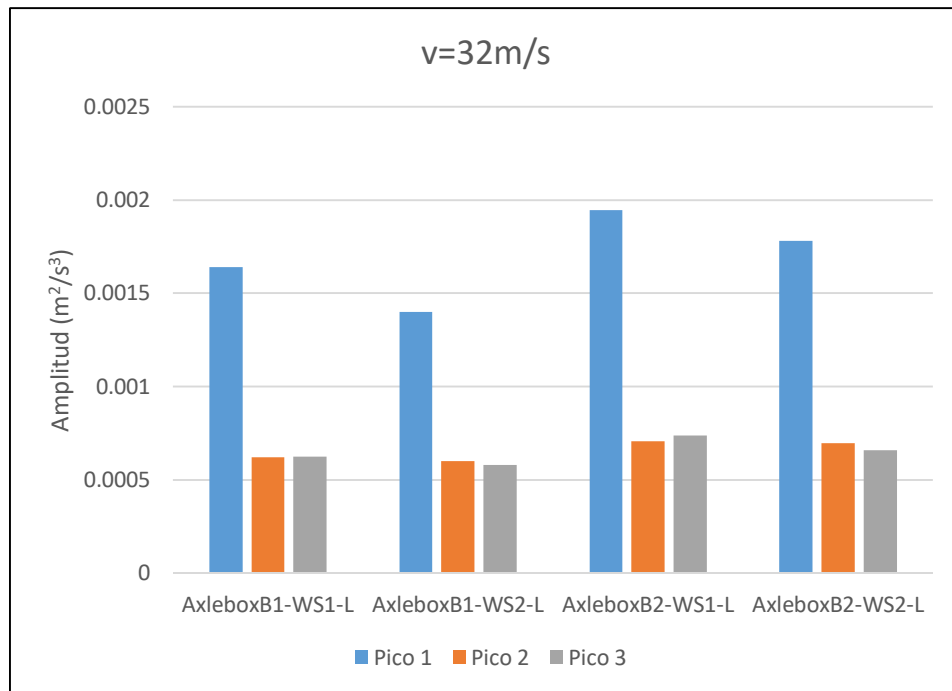
**Figura A.52** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 28 m/s



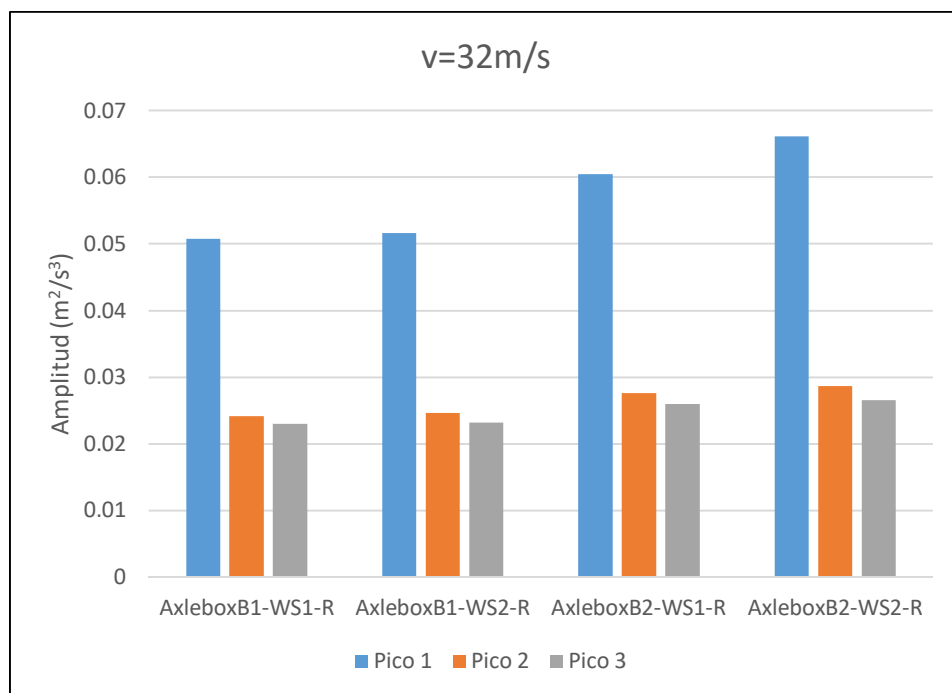
**Figura A.53** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 28 m/s



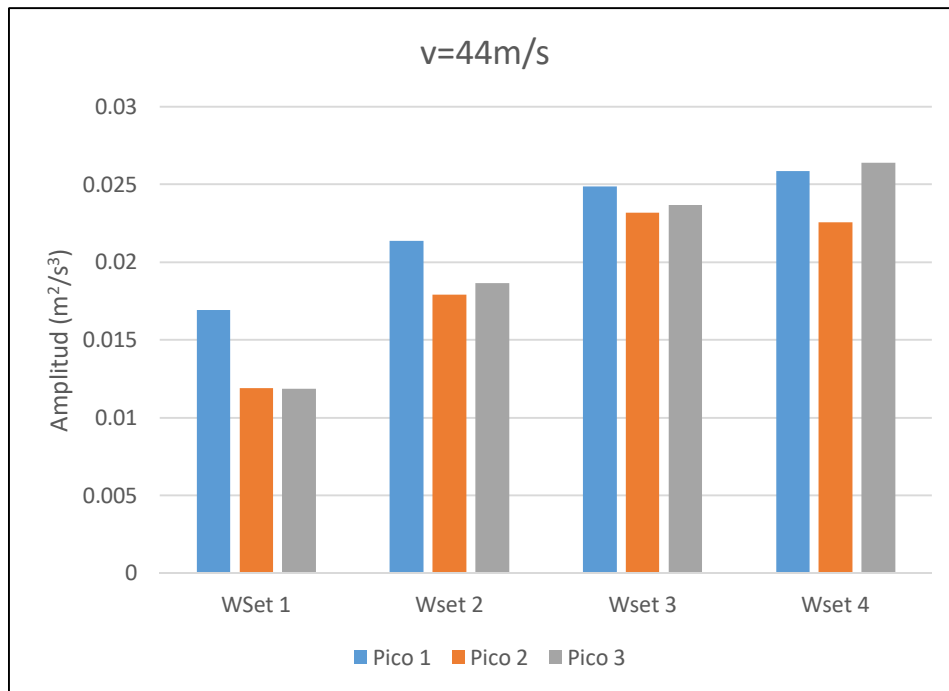
**Figura A.54** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 32 m/s



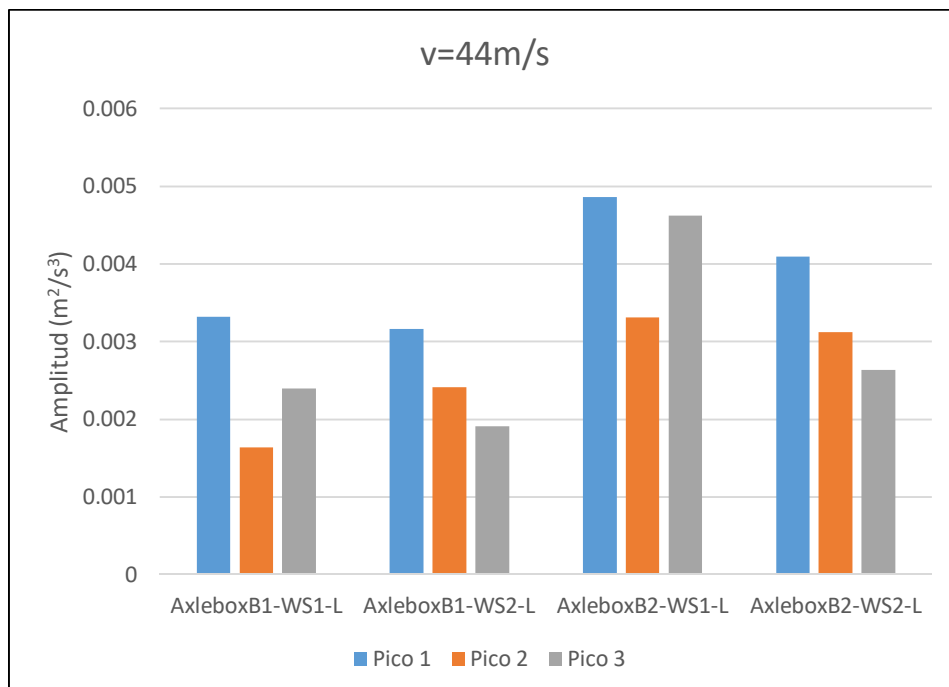
**Figura A.55** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 32 m/s



**Figura A.56** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 32 m/s

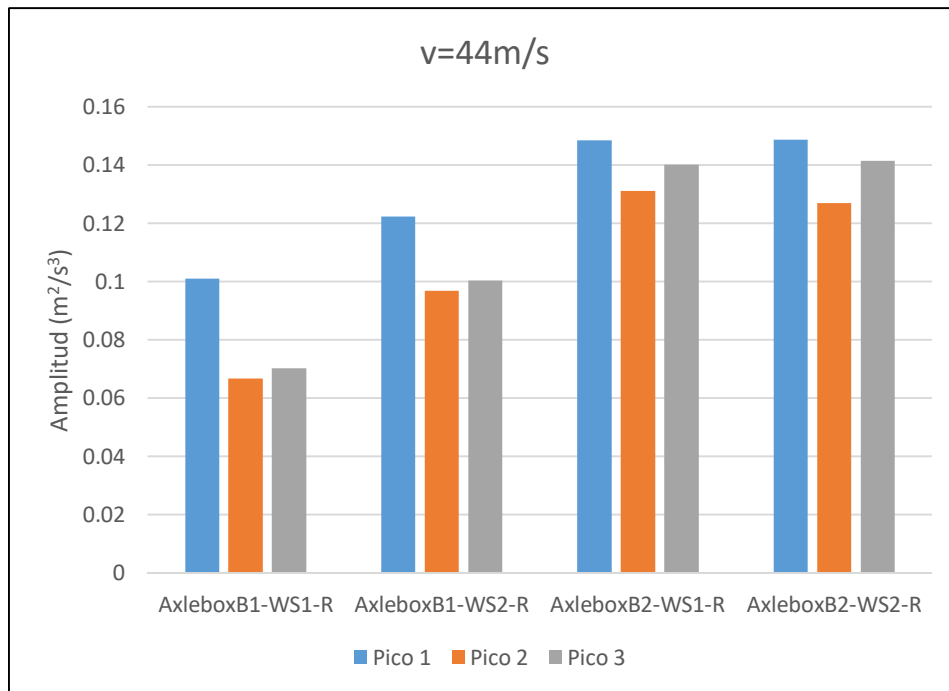


**Figura A.57** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 44 m/s

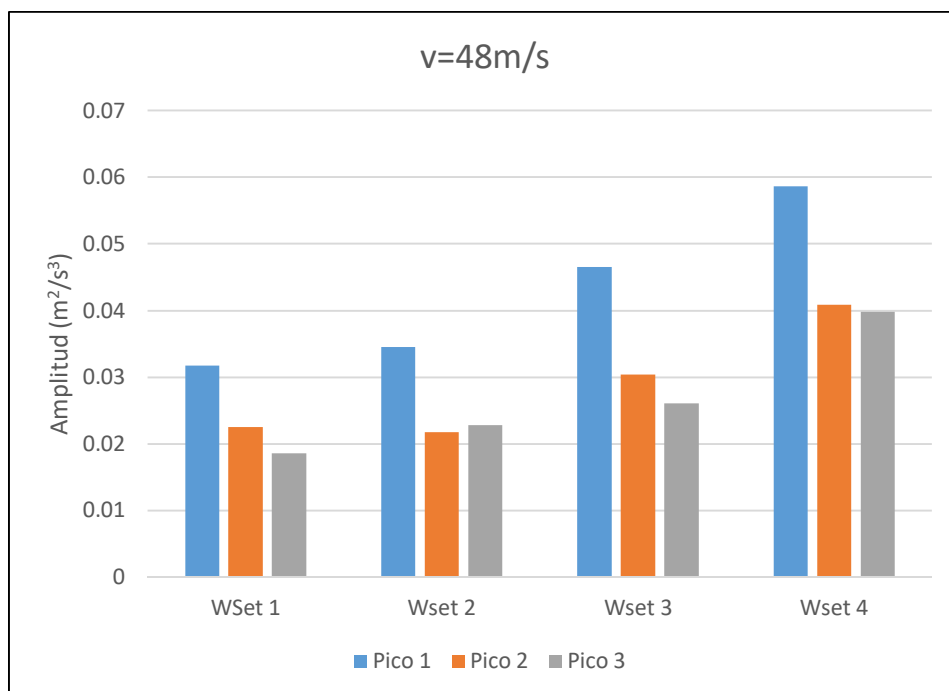


**Figura A.58** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 44 m/s

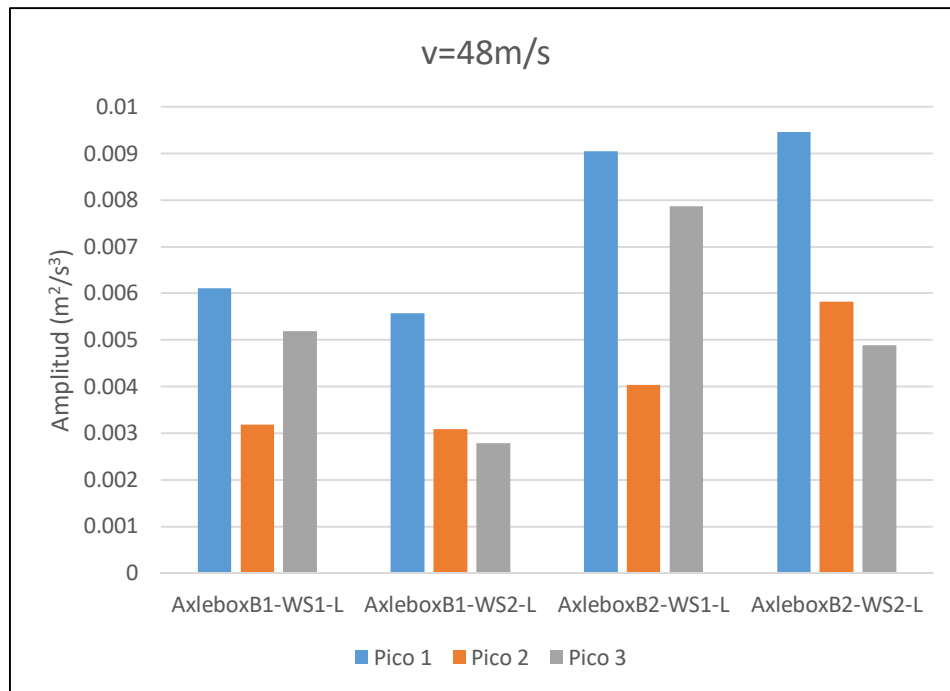




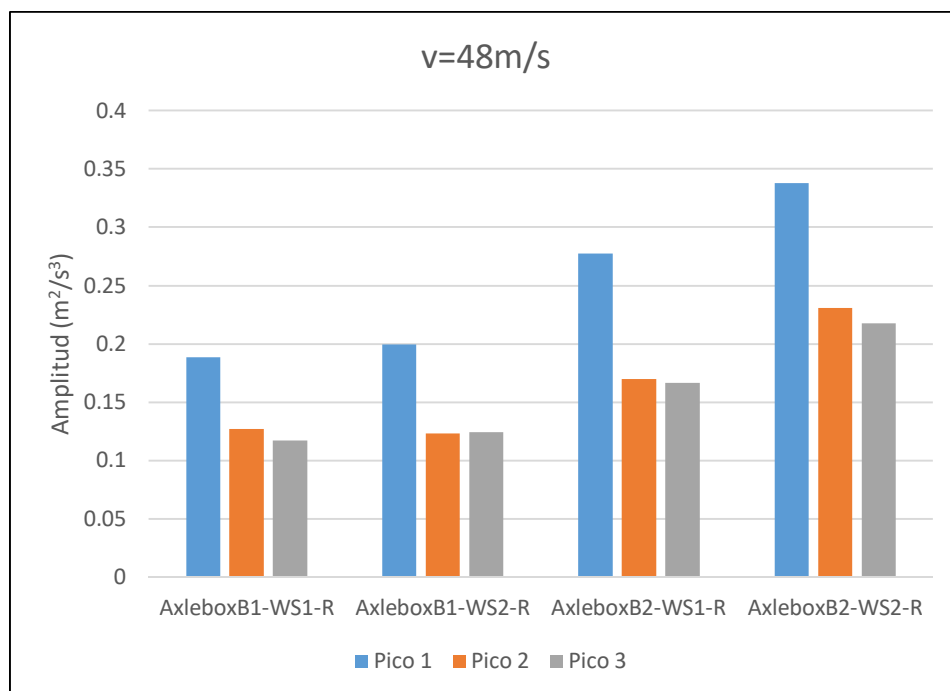
**Figura A.59** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 44 m/s



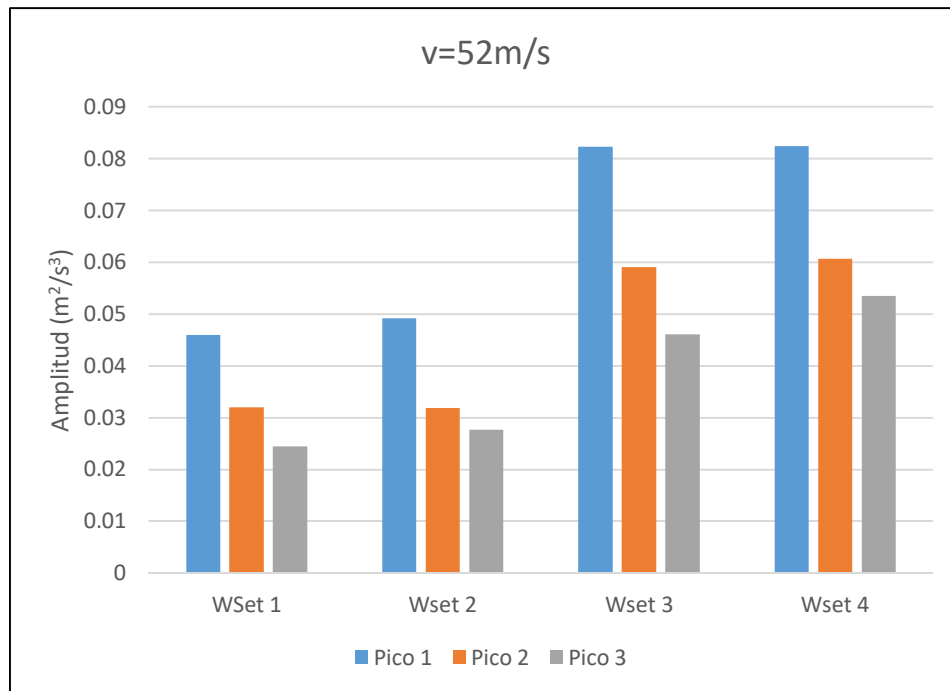
**Figura A.60** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 48 m/s



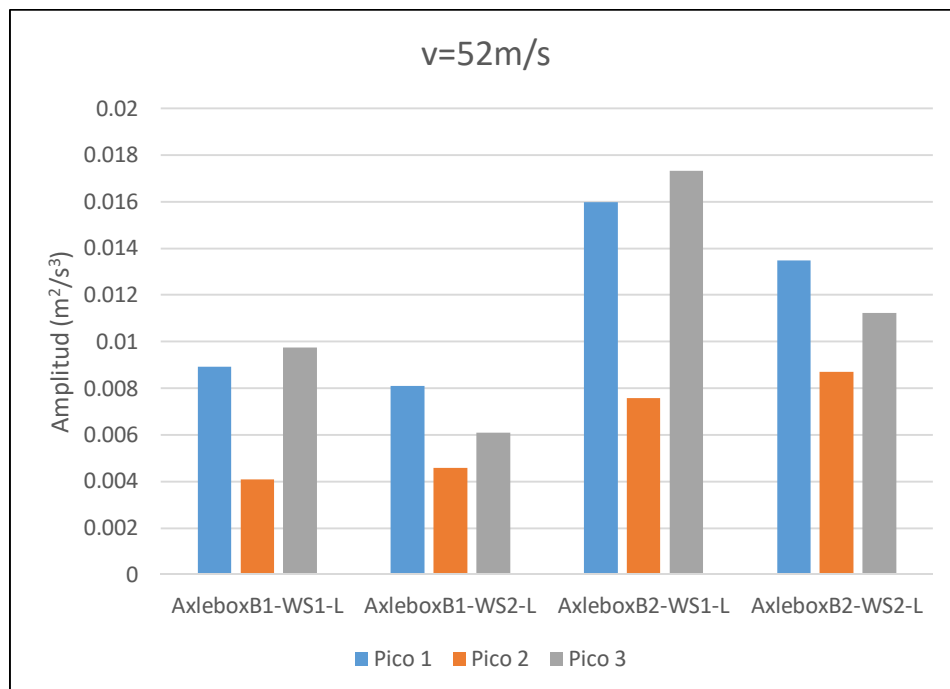
**Figura A.61** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas  
a 48 m/s



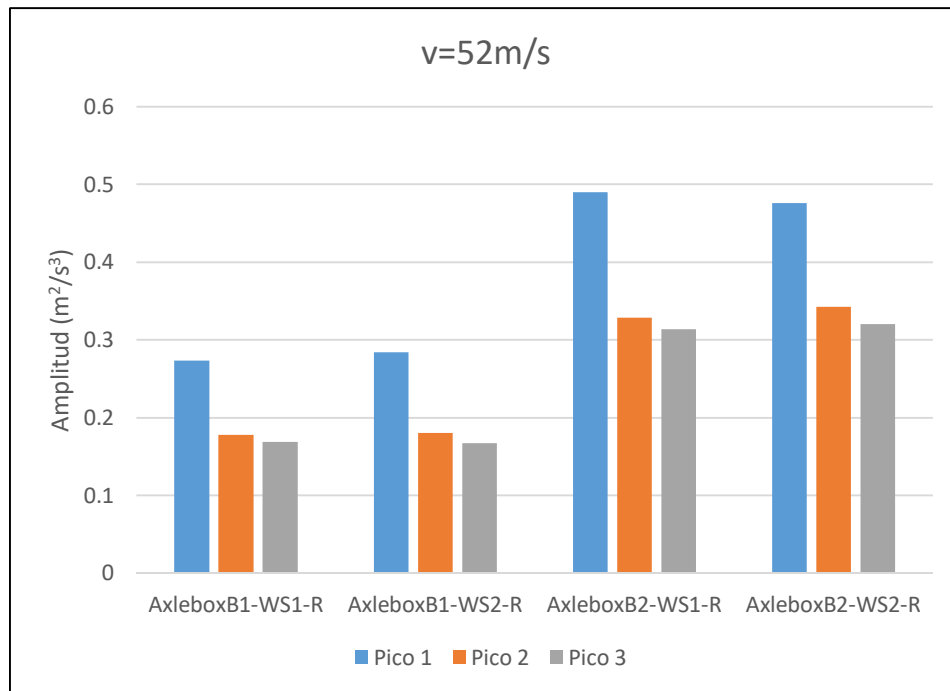
**Figura A.62** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a  
48 m/s



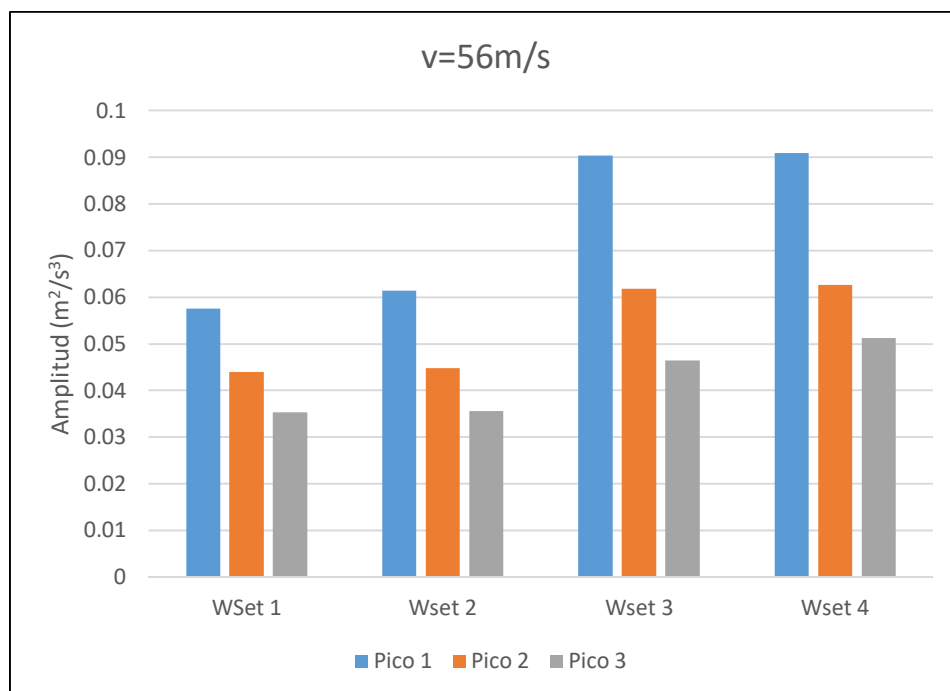
**Figura A.63** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 52 m/s



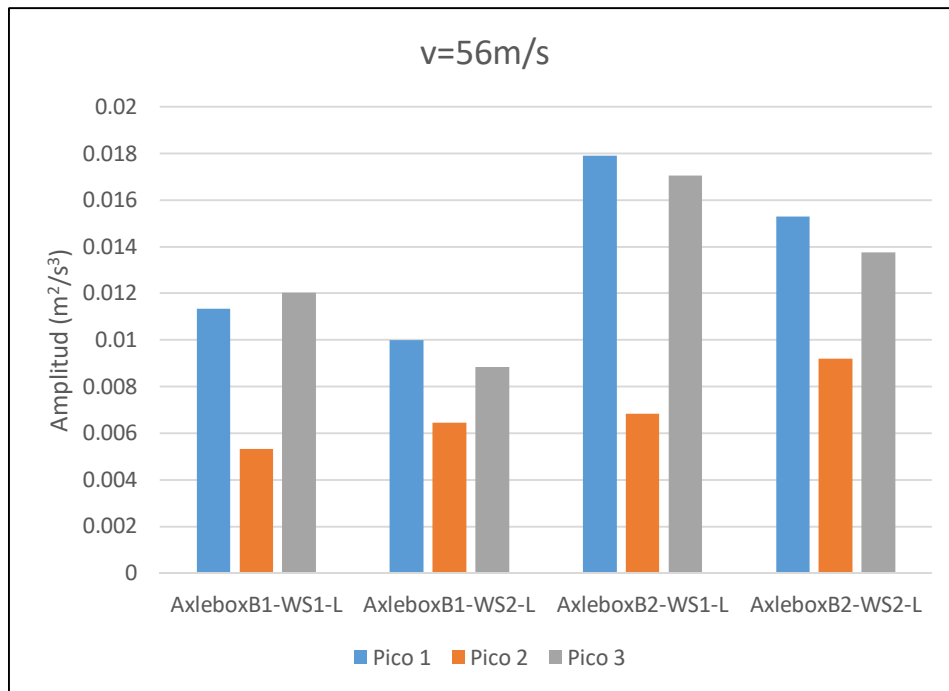
**Figura A.64** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 52 m/s



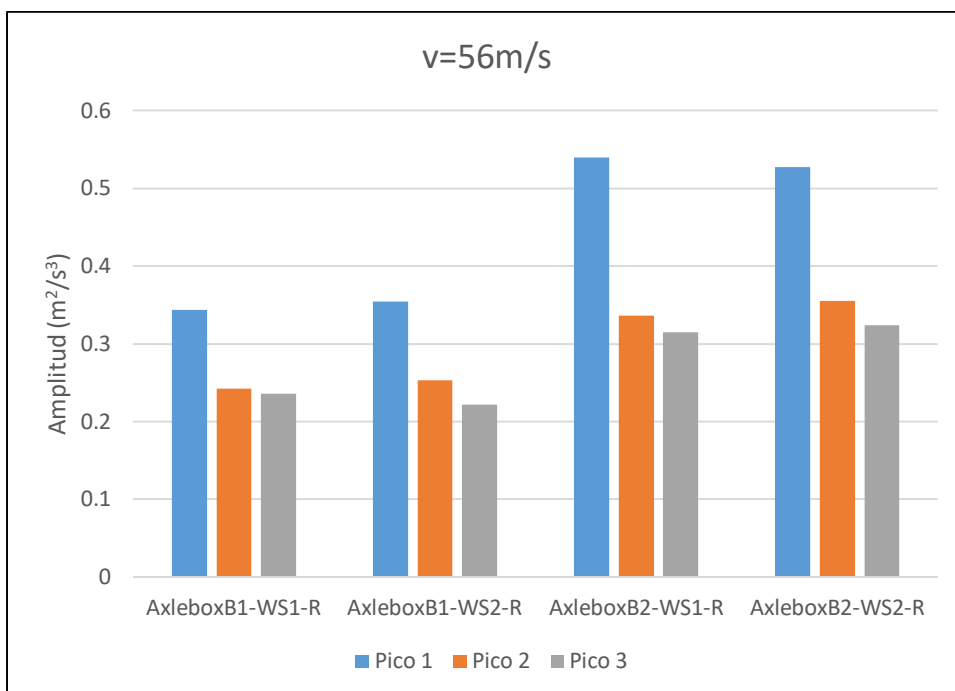
**Figura A.65** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 52 m/s



**Figura A.66** Valor de los tres primeros armónicos en los ejes a 56 m/s



**Figura A.67** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas izquierdas a 56 m/s



**Figura A.68** Valor de los tres primeros armónicos de las cajas de grasas derechas a 56 m/s